



**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS**



Par

RAKOTONANAHARY Tovoniaina Charles

RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostôme

RAJOELISON Lalanirina Gabrielle

RABENILALANA Fetra Mihajamanana

**AOÛT 2008**



## RESUME

Le relief accidenté, le climat agressif favorisé par l'Alizé, ainsi que l'étroite dépendance de la population de l'exploitation forestière et de l'exploitation agricole sans dispositifs de protection antiérosifs, sont les contextes qui permettent de dire que la région de Mandraka est sujette au problème d'érosion. L'étude a pour objectif de déterminer les relations entre les caractéristiques du sol, son mode d'occupation, les précipitations ainsi que l'érosion dans la région de Mandraka et ce en vue d'un aménagement rationnel.

Des dispositifs pour la mesure de pertes en terre et de ruissellement ont été matérialisés sur des parcelles d'expérimentation. A cet effet, le choix de ces parcelles a porté sur le mode d'occupation du sol (sous terrains aménagés, sous « tavy », sous « savoka », et sous forêt naturelle), sur la similitude des pentes et sur leur localisation de manière à ce qu'elles soient situées sur les mi-versants.

Les résultats ont montré que le sol dans cette région contient un taux de matière organique satisfaisant à élevé (2,41 à 3,74% de MO), lui permettant une bonne stabilité structurale ( $I_s = 0,85$  et  $K = 0,08$ ). Les pertes en terre (0,13 à 20,93t/ha/an) et les ruissellements (0,3 à 5%) obtenus indiquent que l'érosion est faible à accélérée suivant le mode d'occupation du sol. En deux ans d'aménagement, les terrasses se sont stabilisées et les racines de *Vetiveria zizanoides* peuvent remplacer les fascines initialement installées pour tenir les talus. Toutefois, l'exposition du sol à la battance de la pluie et la mauvaise infiltration d'eau de ruissellement dans le sol accélèrent le phénomène d'érosion. Par ailleurs, il y a l'efficacité de la SCV sans brûlis bien qu'il s'agit de la première année d'expérience.

Dans ces conditions, un plan d'aménagement simplifié a été proposé en vue (i) de protéger le sol contre la battance de la pluie, (ii) de réduire les transports solides par l'érosion et (iii) d'améliorer l'infiltration d'eau du sol.

**Mots clés :** érosion, ruissellement, pertes en terre, caractéristiques du sol, mode d'occupation du sol, topographie, plan d'aménagement simplifié, Mandraka, Madagascar.

## ABSTRACT

Its hilly relief, its aggressive climate favored by the Trade wind, as well as its close dependence on forestry and on agriculture's exploitation without protection's erosion, are the contexts in which we could say that the Mandraka region is exposed to the problem of erosion and streams. The aim of the study is to determine the relationships between the characteristics of the soil, the precipitation, the way of occupation of the soil, and the erosion in the region of Mandraka in view of a rational development.

Some systems to measure the losses of soil and of stream have been materialized on the experimentation plots. To that end, the selection of these plots was directed towards the different ways of occupation of the soil (under developed grounds, under "tavy", under "savoka", and under natural forest), and towards the evenness of the slopes and towards their location they were to be located on the middle of the slopes.

The results have shown that the soil in this region has a satisfactory or a lot of material organic (2,41 to 3,74% of MO) allowing a good structural stability ( $I_s = 0,85$  and  $K = 0,08$ ). The losses of soil (0,13 to 20,93t/ha/year) and of stream water (0,3% to 5%) obtained show that the erosion is slow or rapid depending on the way of occupation of the soil. Within two years of development, the terraces have stabilized and the roots of *Vetiveria zizanoïdes* can replace the faggots initially fitted out to hold the embankments. However, the soil laid bare being exposed to the lashings of rain, and the absence of plants, the roots of which could have helped in improving the infiltration of stream water, increased the process of erosion very quickly. So, there are the efficient of SCV without to set fire although it's the first year of the experience.

Thus, a simplified development plan has been suggested in order (i) to protect the soil from the lashings of rain, (ii) to reduce the masses of soil swept along by the erosion, and (iii) to improve the infiltration of stream water.

**Key words** : erosion, stream, losses of soil, characteristics of the soil, way of occupation of the soil, topography, simplified development plan, Mandraka, Madagascar.



## LISTE DES ACRONYMES

ACP :	Analyse en Composantes Principales
CDE :	Centre pour le Développement et l'Environnement
CIDST :	Centre d'Information et de Documentation Scientifique et Technique
CIRAD :	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CTFT :	Centre Technique Forestier Tropical
DDC :	Direction du Développement et de la Coopération
DGEF :	Direction Générale des Eaux et Forêts
ESAPP :	Eastern and Southern Africa Partnership Program
ESSA :	Ecole Supérieure des Sciences agronomiques
FAO :	Food and Agriculture Organisation
FOFIFA:	FOibe Fikarohana momba ny Fampanandrosoana ny Ambanivohitra
GPS :	Global Positioning System
JIRAMA :	Jiro sy RAno Malagasy
MO :	Matière Organique
MOF :	Matière Organique Fraîche
PE :	Parcelle Elémentaire
RN :	Route Nationale
SAHA :	Sahan'Asa Hampandrosoana ny eny Ambanivohitra
SCV :	Semis direct sous Couverture Végétale

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
1. Contexte .....	1
2. Problématique .....	2
3. Objectifs et hypothèses.....	2
PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	4
1. Milieu physique.....	4
1.1. Localisation .....	4
1.1.1. Zone d’étude.....	4
1.1.2. Site d’expérimentation .....	5
1.1.2.1. Station forestière de la Mandraka.....	5
1.1.2.2. Terrains de culture.....	5
1.2. Climat.....	6
1.2.1. Température .....	6
1.2.2. Pluviométrie .....	6
1.3. Géomorphologie.....	8
1.4. Pédologie.....	8
1.4.1. Sol ferrallitique typique.....	8
1.4.2. Sol ferrallitique rajeuni.....	9
1.4.3. Sol ferrallitique fortement rajeuni .....	9
1.4.4. Sol peu évolué.....	9
1.5. Hydrographie.....	10
2. Milieu biologique .....	10
2.1. Flore et végétation.....	10
2.1.1. Formation primaire.....	10
2.1.2. Formation secondaire ou « savoka » .....	10
2.1.3. Formation artificielle.....	11
2.2. Faune .....	11
3. Milieu humain .....	12
3.1. Démographie .....	12
3.1.1. Historique et composition de la population.....	12
3.1.2. Répartition de la population .....	12
3.2. Activités économiques .....	13
3.2.1. Agriculture .....	13
3.2.2. Elevage.....	13
3.2.3. Exploitation forestière .....	14
3.2.4. Typologie des activités.....	15

METHODOLOGIE D'ETUDE.....	16
1. Etude bibliographique .....	16
2. Enquêtes socio-économiques .....	16
3. Expérimentations sur terrain .....	17
3.1. Choix et mise en place des parcelles d'étude .....	17
3.2. Mesure de la pluviosité .....	18
3.3. Description du profil pédologique.....	19
3.4. Collecte et mesure des pertes en terre et du ruissellement .....	19
3.5. Prélèvement d'échantillons du sol pour l'analyse au laboratoire .....	20
3.6. Densité apparente .....	21
4. Analyse au laboratoire.....	22
4.1. Analyse granulométrique .....	22
4.2. pH <sub>eau</sub> .....	22
4.3. Analyse du carbone et de l'azote.....	22
4.3.1. Méthode d'analyse du carbone.....	22
4.3.2. Méthode d'analyse de l'azote.....	23
4.4. Evaluation de la stabilité du sol.....	23
4.4.1. Indice d'érodabilité K.....	23
4.4.2. Indice d'instabilité Is .....	24
5. Traitement et analyse des données .....	24
5.1. Test d'égalité de moyenne.....	25
5.2. Test de corrélation.....	25
5.3. Analyse en Composantes Principales (ACP) .....	25
6. Synthèse de la démarche méthodologique .....	26
7. Limites et contraintes de l'étude .....	27
RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	28
1. Généralités.....	28
1.1. Sol .....	28
1.1.1. Texture .....	28
1.1.2. Structure .....	28
1.1.3. Matière organique (MO) du sol.....	29
1.1.4. Rapport C/N .....	29
1.2. Erosion hydrique .....	30
1.2.1. Définitions.....	30
1.2.2. Différentes formes d'érosion hydrique dans la région de Mandraka .....	30
1.2.2.1. Erosion en nappe ou stade initial de l'érosion hydrique.....	30
1.2.2.2. Erosion en griffe ou ruissellement en rigole .....	30

1.2.2.3. Erosion en ravine.....	30
1.2.2.4. Erosion en masse.....	31
1.2.3. Différents effets d'érosion.....	31
1.2.3.1. Sur les éléments nutritifs du sol .....	31
1.2.3.2. Sur le profil et le modelé .....	31
1.2.3.3. Autres effets .....	32
1.2.4. Techniques de lutte antiérosive pratiquées à Mandraka.....	32
1.2.4.1. Technique traditionnelle.....	32
1.2.4.2. Aménagement des terrains marginaux en terrasse .....	32
1.2.4.3. Techniques culturales .....	33
2. Caractéristiques biophysiques des sites d'expérimentation .....	34
2.1. Variabilité du climat.....	34
2.2. Différents modes d'occupation du sol.....	35
2.2.1. Parcelles aménagées avec des lutttes antiérosives.....	35
2.2.2. Parcelle sous « tavy » .....	36
2.2.3. Parcelles témoins.....	37
2.3. Caractéristiques des parcelles d'expérimentation .....	38
3. Erosion .....	39
3.1. Suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie .....	39
3.1.1. Pertes en terre suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie.....	39
3.1.1.1. Corrélation entre les pertes en terre et la hauteur de pluie .....	39
3.1.1.2. Pertes en terre suivant la hauteur de pluie .....	39
3.1.1.3. Pertes en terre cumulées dans les parcelles élémentaires .....	42
3.1.1.4. Comparaison des pertes en terre sur les parcelles d'étude .....	43
3.1.2. Ruissellement suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie .....	44
3.1.2.1. Corrélation entre le ruissellement et la hauteur de pluie .....	44
3.1.2.2. Quantité de ruissellement en fonction de la hauteur de pluie.....	45
3.1.2.3. Ruissellements cumulés dans les parcelles élémentaires .....	47
3.1.2.4. Comparaison des quantités d'eau de ruissellement sur les parcelles d'étude.....	47
3.1.3. Influence du mode d'occupation de sol sur l'érosion.....	48
3.1.3.1. Corrélation entre les pertes en terre et les ruissellements.....	49
3.1.3.2. Pertes en terre et ruissellements suivant le mode d'occupation de sol.....	49
3.2. Suivant les caractéristiques du sol.....	50
3.2.1. Résultats d'analyse du sol .....	50
3.2.1.1. pH.....	50
3.2.1.2. Matière organique .....	51
3.2.1.3. Carbone et azote .....	52
3.2.1.4. Indices d'instabilité et indices d'érodabilité.....	53

3.2.2. Influence des caractéristiques du sol sur l'érosion .....	53
4. Relations entre la pluie, le mode d'occupation, la topographie, les caractéristiques du sol ainsi que les pertes en terre et le ruissellement. ....	54
4.1. Variables explicatives .....	54
4.2. Corrélation entre les variables.....	55
4.3. Classement des parcelles élémentaires suivant les variables retenues .....	56
4.4. Synthèse des relations entre la pluie, le relief, le sol, la couverture végétale et l'érosion.....	57
DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	58
1. Discussions.....	58
1.1. Méthodologie .....	58
1.2. Résultats .....	58
1.2.1. Erosion .....	58
1.2.2. Caractéristiques du sol .....	59
1.2.3. Evolution de la stabilité du sol sur les parcelles aménagées en terrasse .....	59
1.2.4. Perspectives paysannes sur la valorisation rationnelle des bassins versants .....	60
1.3. Vérification des hypothèses .....	60
2. Plan d'aménagement simplifié .....	61
2.1. Contexte .....	61
2.2. Objectifs et stratégies .....	61
2.3. Activités à entreprendre .....	62
2.3.1. Sur le plan technique .....	62
2.3.1.1. Au sommet des Tanety .....	62
2.3.1.2. Sur les versants.....	62
2.3.1.3. Sur les bas de pente .....	64
2.3.2. Sur le plan socio-économique .....	64
2.3.2.1. Développement d'autres activités .....	64
2.3.2.2. Sensibilisation et formation.....	64
2.4. Cadre logique .....	65
CONCLUSION .....	67
BIBLIOGRAPHIE .....	68
ANNEXES	

## LISTE DES CARTES

Carte n°1 : Localisation de la zone d'étude (BD 500 – FTM, 2002) .....	4
Carte n°2 : Carte de localisation des parcelles d'étude .....	18

## LISTE DES FIGURES

Figure n°1 : Variation de la température dans la région de Mandraka (1951 à 1980) .....	6
Figure n°2 : Répartition de la pluie dans la région de Mandraka (1951 à 1980) .....	6
Figure n°3 : Climatogrammes de la région de Mandraka .....	7
Figure n°4 : Profil topographique Antananarivo - Toamasina .....	8
Figure n°5 : Toposéquence de sols sur les reliefs de dissection de la zone de Mandraka.....	9
Figure n°6 : Répartition de la population par hameau.....	12
Figure n°7 : Répartition de la population par classe d'âge.....	12
Figure n°8 : Différentes activités génératrices de revenu des ménages à Mandraka .....	15
Figure n° 9 : Prélèvement des échantillons (couche A) suivant la diagonale .....	21
Figure n°10 : Synthèse de la démarche méthodologique .....	26
Figure n°11 : Variation de la quantité de pluie de 1992 à 2008.....	34
Figure n°12 : Dynamisme de la pluie de 1950 à 1980 et 1992 à 2007.....	34
Figure n°13 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE1 .....	39
Figure n°14 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE2 .....	40
Figure n°15 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE3 .....	40
Figure n°16 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE4 .....	41
Figure n°17 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE5 .....	41
Figure n°18 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE6 .....	42
Figure n°19 : Cumul des pertes en terre durant les jours de prélèvement.....	42
Figure n°20 et n°21 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur les parcelles aménagées en terrasse (PE1 et PE2).....	45
Figure n°22 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE3.....	45
Figure n°23 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle sous « tavy » .....	46
Figure n°24 et n°25 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur les parcelles témoins .....	46
(PE5 et PE6).....	46
Figure n°26 : Cumul des ruissellements durant les jours de prélèvement.....	47
Figure n°27 : Pertes en terre sur les parcelles d'expérimentation (t/ha/an).....	49
Figure n°28 : Ruissellements sur les parcelles d'expérimentation (en l/ha) .....	49
Figure n°29 : Taux de matières organiques dans les parcelles d'étude.....	51
Figure n°30 : Indice d'instabilité Is.....	53
Figure n°31 : Indice d'érodabilité K .....	53
Figure n°32 : Cercle de corrélation entre les variables selon les axes F1 et F2 (a) et F1 et F3 (b) de l'Analyse en Composantes Principales .....	55

Figure n°33 : Répartition des parcelles élémentaires selon les axes F1 et F2 (a) et F1 et F3 (b) de l'Analyse en Composantes Principales .....	56
Figure n°34 : Synthèse des relations entre la pluie, le relief, le sol, la couverture végétale et l'érosion	57

## LISTE DES PHOTOS

Cliché n°01 : Fosse pédologique pour l'examen du profil.....	19
Cliché n°02 : Dispositif pour le stockage des pertes en terre et des pertes en eau .....	20
Cliché n°03 : Cylindre métallique pour la mesure de la densité apparente.....	21
Cliché n°04 et n°05 : Manifestations de l'érosion en nappe sur une parcelle de culture avec un développement de l'érosion en griffe ou en rigole.....	31
Cliché n°06 : Aménagement de terrain en terrasse suivant les courbes de niveaux.....	33
Cliché n°07 : Parcelle PE1 .....	35
Cliché n°08 : Parcelle PE2 .....	35
Cliché n°09 : Parcelle PE3 .....	36
Cliché n°10 : Parcelle PE4 .....	36
Cliché n°11 : Parcelle PE5 .....	37
Cliché n°12 : Parcelle PE6 .....	37

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Listes des espèces caractéristiques des forêts naturelles.....	11
Tableau n°2 : Classification de l'érodabilité du sol .....	24
Tableau n°3 : Indice d'appréciation du rapport C/N .....	30
Tableau n°4 : Liste des espèces dominantes dans la parcelle PE 5 .....	37
Tableau n°5 : Liste des espèces dominantes dans la parcelle PE 6.....	37
Tableau n°6 : Caractéristiques des parcelles élémentaires.....	38
Tableau n°7 : Corrélations R de Spearman entre les pertes en terre et la pluie .....	39
Tableau n°8 : Quantité de perte en terre en t/ha et en mm .....	43
Tableau n°9 : Corrélations R de Spearman entre le ruissellement et la hauteur de pluie .....	44
Tableau n°10 : Quantité d'eau de ruissellement sur les parcelles élémentaires .....	47
Tableau n°11 : Corrélations R de Spearman entre pertes en terre et ruissellements .....	49
Tableau n°12 : pH de l'horizon A et de l'horizon B de parcelles élémentaires .....	50
Tableau n°13 : Quantités de matières organiques dans les parcelles élémentaires .....	51
Tableau n°14 : Valeurs du rapport C/N et quantités de C et N lessivés dans les parcelles d'étude .....	52
Tableau n°15 : Corrélations R de Spearman entre pertes en terre, ruissellement et caractéristique du sol .....	54
Tableau n°16 : Objectifs et stratégies pour l'aménagement.....	61
Tableau n°17 : Cadre logique pour l'aménagement.....	65

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : Données climatiques de la région de Mandraka.....	I
ANNEXE II : Méthode d'analyse des sols.....	II
ANNEXE III : Détermination de l'indice d'érodabilité K.....	V
ANNEXE IV : Triangle de texture.....	VI
ANNEXE V : Description du profil pédologique .....	VII
ANNEXE VI : Synthèses des résultats d'analyse au laboratoire .....	X
ANNEXE VII : Résultats des mesures d'érosion et de ruissellement.....	XI
ANNEXE VIII : Analyses statistiques.....	XIII
ANNEXE IX : Classe d'érosion.....	XVI
ANNEXE X : Détermination des MO, C et N lessivés par l'érosion.....	XVI
ANNEXE XI : Interprétation du niveau des matières organiques en fonction du taux d'argiles.....	XVII

\*\*\* § \*\*\*



# *INTRODUCTION*

*P*

## **INTRODUCTION**

### **1. Contexte**

Le sol est défini comme une couche superficielle de l'écorce terrestre. Il est le support nourricier des plantes et assure les besoins alimentaires des animaux et des hommes. A Madagascar, la majorité de la population est constituée d'agriculteurs, et leur subsistance dépend surtout de la productivité du sol.

Toutefois, l'exploitation abusive des sols comme toute autre ressource naturelle et leur valorisation non appropriée provoquent leur épuisement et rendent même irréversible leur dégradation. Aussi, les résultats de la mauvaise gestion des terres conduisent-ils notamment à la pauvreté en éléments nutritifs des sols d'une part et entraînent l'accentuation de l'érosion causée par la dénudation des sols d'autre part. De plus, les exploitations irrationnelles des ressources forestières ainsi que la persistance de la pratique de la « culture sur brûlis » ou « tavy » constituent les causes primordiales de ces problèmes. La diminution de la productivité du sol affecte notamment sur le rendement des cultures. D'après ROOSE (1984), « l'érosion en nappe, formée généralement sur des terrains de culture, occasionne une perte en terre de l'ordre de 1 à 2mm/an (environ 15 à 20t/ha/an) suivant la densité apparente du sol ».

La présence d'une station hydroélectrique caractérise pourtant la région de Mandraka. Suite aux ensablements successifs des bas-fonds, les rivières constituant les réseaux hydrographiques risquent d'être encombrées, ce qui conduit ainsi à la diminution du débit du barrage hydroélectrique. Par conséquent, la production de l'énergie électrique approvisionnant la ville d'Antananarivo et ses environs rencontrerait probablement de sérieux problèmes.

Dans ces conditions, le projet ESAPP a été implanté à Mandraka. Il a pour but de pallier et d'atténuer ces problèmes de mauvaises valorisations des terrains liés aux problèmes d'érosion et de fertilité du sol. Il s'agit de la mise en place d'un « plan d'aménagement simplifié » d'un bassin versant pilote. Son objectif consiste à diffuser des modèles et techniques d'aménagement afin d'assurer un développement durable et de récupérer et régénérer les terrains défrichés.

Toutefois, le plan d'aménagement devrait être pertinent pour être à la portée des paysans et facile à réaliser. C'est pourquoi l'étude des relations entre la pluie, le relief, le sol, la couverture végétale et l'érosion dans la région de Mandraka s'avère nécessaire. Elle permettra d'apporter des informations utiles pour l'amélioration de ce plan d'aménagement existant et de permettre une bonne conduite du projet de développement dans la région.

## 2. Problématique

Le problème d'érosion n'est pas un fait nouveau à Madagascar. Il sévit dans la partie Est de l'île et plus particulièrement dans la région de Mandraka. Cet handicap provient de la disparition à une vitesse alarmante de la couverture végétale. LEEMAN (1989), a constaté une diminution de 50% des forêts naturelles et une augmentation de huit fois et plus des surfaces défrichées en 20 ans.

Par ailleurs, la diminution progressive des couvertures forestières liée notamment à la pratique des cultures sur brûlis continue encore et expose le sol à l'érosion.

En fait, la forte proportion de la population migrante de cette région constitue principalement l'une des causes de cette dégradation. Pour gagner leur vie et satisfaire leurs besoins, ces migrants cherchent à conquérir de nouvelles terres forestières pour en exploiter les ressources. La technique de culture traditionnelle recourant à l'utilisation du feu est la plus pratiquée car cette méthode leur procure une production rémunératrice à moindre coût du fait de la minimisation des moyens de production.

De plus, la position géographique de cette région sur la première falaise orientale de la côte Est favorise l'influence directe de l'Alizé. Le climat y est caractérisé en effet par de fortes pluviosités où la précipitation moyenne annuelle, répartie sur 157 jours, atteint 2 300mm (données météorologiques de 1950 à 1980). Suite à la variation climatique qui est un problème récent, la quantité des pluies pendant la plupart des mois de l'année à Mandraka diminue alors qu'une grande partie des précipitations se concentre sur certaines périodes intensifiant ainsi le phénomène d'érosion.

En outre, le sol de Mandraka, de type friable surtout en profondeur, est sensible à l'érosion et s'écroule facilement. D'après RANDRIAMBOAVONJY (in RAJOELISON *et al.*, 2007) : « la dominance des sols ferrallitiques rajeunis et pénévulés est due à la topographie accidentée ». Les caractéristiques du sol et le relief fortement accidenté, dont la plupart des pentes sont très raides, accentuent le problème d'érosion dans cette région.

Ces différents facteurs que sont le climat, la topographie, les caractéristiques des sols ainsi que leur mode d'occupation ont-ils des interrelations avec les problèmes d'érosion? Lequel (lesquels) de ces paramètres est (sont) le(s) plus influent(s) sur l'érosion ?

## 3. Objectifs et hypothèses

L'objectif général consiste à déterminer les relations qui peuvent exister entre les conditions climatiques, la topographie, les caractéristiques du sol, l'occupation du sol, l'érosion en vue de concevoir un aménagement rationnel pour la région de Mandraka.

Dans cette optique, quelques objectifs spécifiques devraient être pris en compte à savoir :

- Connaître les caractéristiques des sols dans chaque site d'expérimentation ;
- Connaître les niveaux de pertes en terre et l'intensité des ruissellements suivant les variations de la pluviométrie et le mode d'occupation du sol<sup>1</sup> ;
- Analyser les relations qui peuvent exister entre les précipitations, les caractéristiques du sol, l'occupation du sol et l'érosion ;
- Proposer un plan d'aménagement simplifié de la région de Mandraka.

Les hypothèses suivantes sont émises :

- Le mode d'occupation et de gestion du sol par une couverture végétale le rend moins sensible à l'érosion ;
- Les facteurs favorisant la stabilité structurale du sol atténuent le problème d'érosion.

Ainsi, le présent mémoire est articulé en quatre grandes parties. La première donne un aperçu général sur la zone d'étude, la seconde montre les démarches méthodologiques adoptées, la troisième présente les résultats avec leurs interprétations, enfin, la dernière comprend les discussions et recommandations incluant une proposition d'un plan d'aménagement simplifié à partir des résultats obtenus.

\*\*\* § \*\*\*

---

<sup>1</sup> Les différents modes d'occupation du sol : sous terrains aménagés (biomécaniques et biologique), sous « tavy », sous « savoka » et sous forêts.

Partie 1

*PRESENTATION  
DE LA ZONE D'ETUDE*

*P*

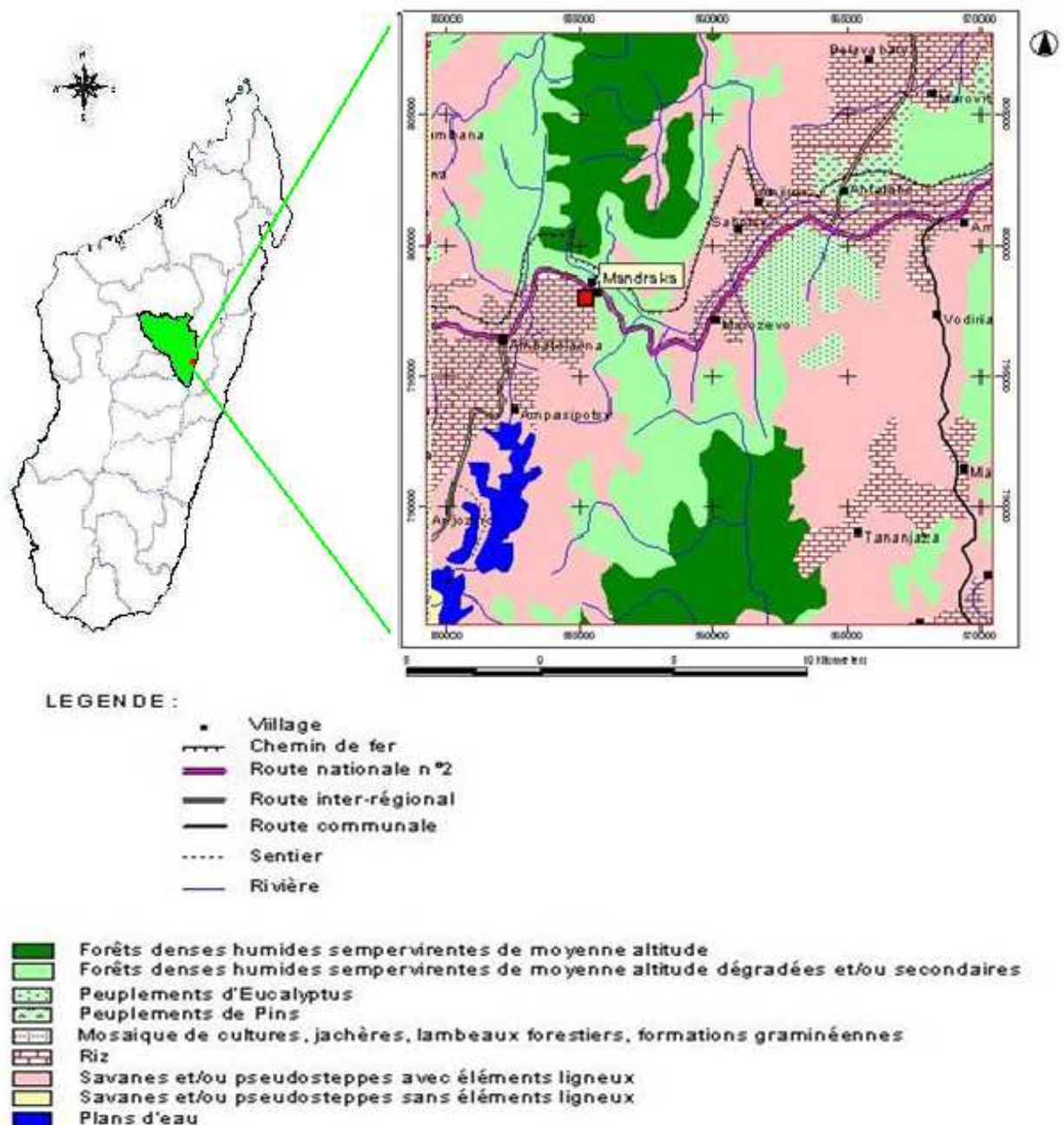
## PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette première partie se subdivise en trois sous-parties : le milieu physique qui permet de localiser et de caractériser la zone d'étude, le milieu biologique qui rapporte les caractéristiques des paramètres biologiques de la région et le milieu humain qui évoque le mode de vie et l'organisation de la population dans son environnement.

### 1. Milieu physique

#### 1.1. Localisation

##### 1.1.1. Zone d'étude



Carte n°1: Localisation de la zone d'étude (BD 500 – FTM, 2002)

Sur le plan géographique, la région de Mandraka se trouve entre les points kilométriques 65 et 70 sur la RN2 reliant Antananarivo-Toamasina et est comprise entre les points géodésiques 18°54' et 18°55' de latitude Sud et 47°55' et 47°56' de longitude Est. Elle est localisée sur la première falaise orientale de l'Île. L'altitude moyenne est de 1 210m.

Sur le plan administratif, le village du Mandraka appartient au (à la) :

- Région Analamanga ;
- District Manjakandriana ;
- Commune Ambatolaona ;
- Et Fokontany Mandraka.

D'après l'autorité administrative locale, le Fokontany actuel est limité au Nord par Ankadilalana, au Sud-Est par Ambatolaona Est ; à l'Est par Mahasoà et à l'Ouest par Ambatolaona Est et Ambatolaona Ouest.

#### 1.1.2. Site d'expérimentation

La zone de Mandraka se subdivise en deux parties séparées par la rivière Mandraka : d'une part, la propriété privée appartenant à la famille RAMAHERISON au Nord et d'autre part, le terrain domanial, au Sud, où les parcelles d'expérimentation ont été installées. Autour de la limite Nord-Est de la station forestière, cinq sur six de ces parcelles de mesure ont été placées dans les parcelles de culture d'un des paysans pilotes tandis que la dernière a été installée dans la forêt naturelle.

##### *1.1.2.1. Station forestière de la Mandraka*

La station forestière, qui appartient au domaine de l'Etat, couvre une superficie de 22ha. Cette station est destinée principalement aux recherches et à la formation des étudiants de l'ESSA depuis 1986. Suite à une convention entre le Service Provincial des Eaux et Forêts (actuellement DGEF) et le Département des Eaux et Forêts de l'ESSA en 1986, elle était devenue un site d'application géré par le dit Département. Depuis, le Département des Eaux et Forêts a travaillé en collaboration avec les paysans riverains pour réaliser des travaux d'aménagement et pour gérer au mieux les ressources forestières.

##### *1.1.2.2. Terrains de culture*

En dehors de la station forestière, les terrains voisins sont occupés par la population riveraine. Les terrains, localisés sur les mi-versants et sur les bas de pente, sont utilisés comme terrains de culture alors que ceux situés en amont sont boisés d'*Eucalyptus sp.* pour le charbonnage ou pour les bois de construction.

Sur les terrains de culture, des projets de développement, notamment le projet ESAPP, ont mis en place des activités, sources de revenus pour les paysans, entre autre le mode de valorisation de terrain à long terme des terrains qui leur permet d'abandonner le mode de culture traditionnel. Pour ce faire, ce projet a choisi quelques paysans pilotes pour servir de cible de la vulgarisation des nouvelles techniques culturales et de tâches d'huile dans cette région.

## 1.2. Climat

La situation de la Mandraka sur la première falaise orientale influencée directement par l'Alizé lui donne un caractère climatique de la côte Est et son niveau d'altitude élevé lui prête celle des Hauts-Plateaux. (Cf. ANNEXE 1)

### 1.2.1. Température

La température mensuelle de 1951 à 1980 est illustrée par la figure ci-après :

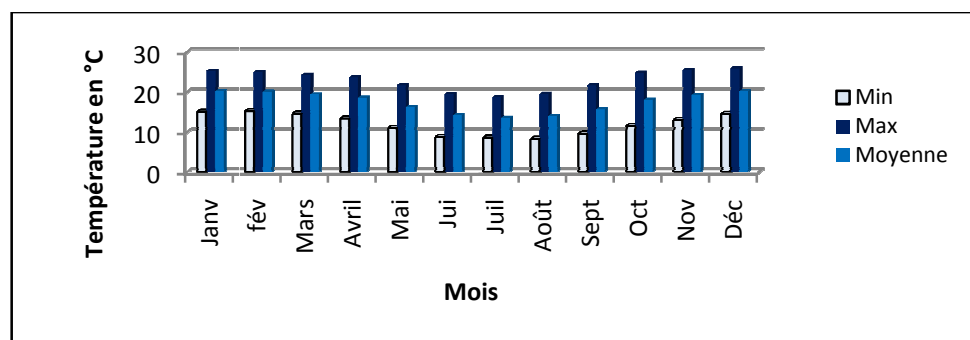


Figure n°1 : Variation de la température dans la région de Mandraka (1951 à 1980)  
Source : Direction de la Météorologie Nationale

La température moyenne annuelle est de 17,45°C. Les mois de novembre, décembre et janvier sont les plus chauds durant lesquels la température varie autour de 25°C. Par contre, les mois de juin au mois d'août, où les températures oscillent entre 8,3°C et 8,6°C, sont les plus froids.

### 1.2.2. Pluviométrie

La répartition mensuelle de la précipitation dans la région de Mandraka est illustrée par la figure suivante :

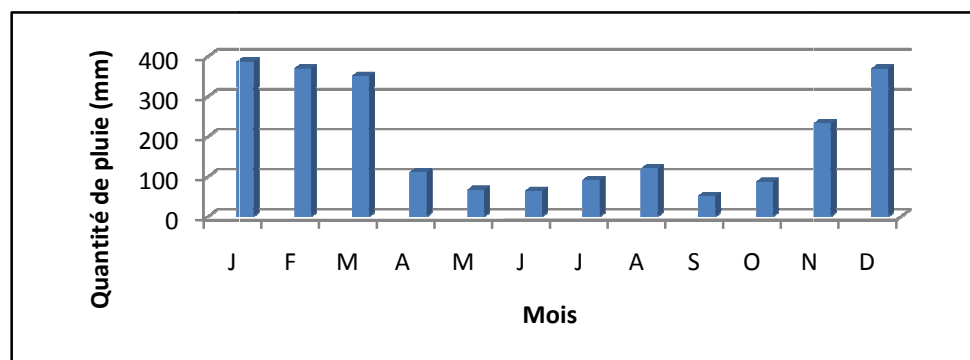


Figure n°2 : Répartition de la pluie dans la région de Mandraka (1951 à 1980)  
Source : Direction de la Météorologie Nationale



Influencé par l'Alizé, aucun mois n'est écologiquement sec dans la région de Mandraka où il pleut toute l'année. De 1951 à 1980, la pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 2 300mm. Les précipitations mensuelles minimale et maximale sont respectivement 51,8mm en septembre (2,3%)<sup>2</sup> et 386,8mm en janvier (16,8%).

Toutefois, due à la variabilité climatique, la grande partie de la quantité de pluie annuelle se concentre sur certaines périodes. De 1992 à 2007, 46% de la précipitation moyenne annuelle s'accumulent dans les mois de janvier et février.

Selon le principe de Gaussen, la Courbe Ombrothermique permet de déterminer la saison sèche et la saison humide et/ou perhumide d'une région donnée. Elle a été améliorée par WALTER et LEITH, en 1967, par l'ajout de plus de renseignements climatiques sur le graphe.

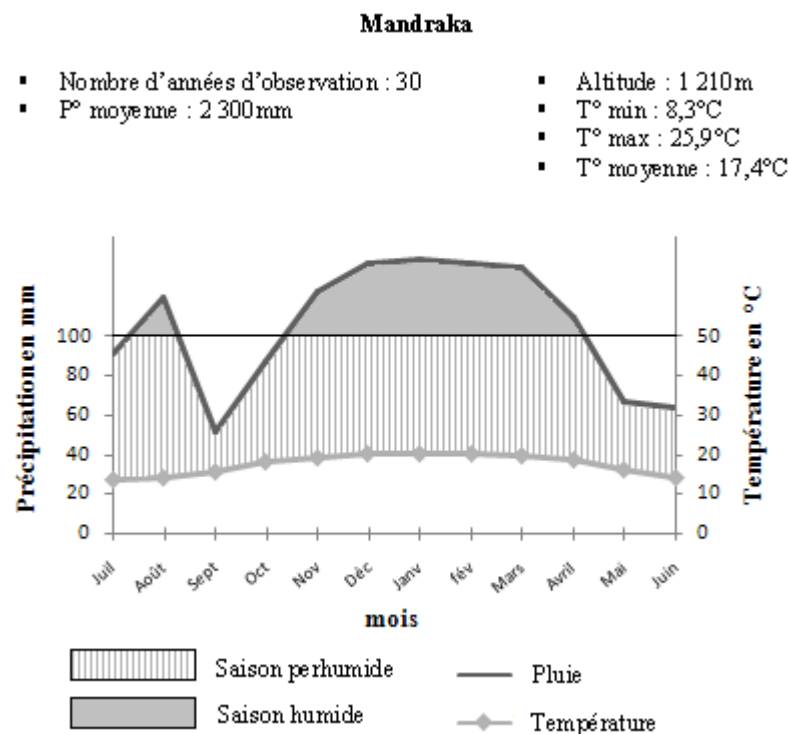


Figure n°3 : Climatogrammes de la région de Mandraka  
(selon WALTER et LIETH, 1967)

Le climat de la région de Mandraka est tropical de montagne du type frais humide. Aucune saison sèche n'a été constatée toute l'année. Seulement, la quantité de pluie d'un mois à l'autre permet de distinguer les deux saisons de la région à savoir :

- la saison perhumide du mois de novembre au mi- avril ;
- la saison humide de mi- avril au mois d'octobre.

<sup>2</sup> Pourcentage par rapport à la quantité de pluie annuelle

### 1.3. Géomorphologie

Le relief est fortement accidenté à Mandraka. Il est caractérisé par une chaîne montagneuse dont la plupart des pentes sont très raides, plus de 50%, et pouvant atteindre 90%. Sa position au premier flanc Est de l'île l'expose à l'Alizé qui favorise la forte précipitation.

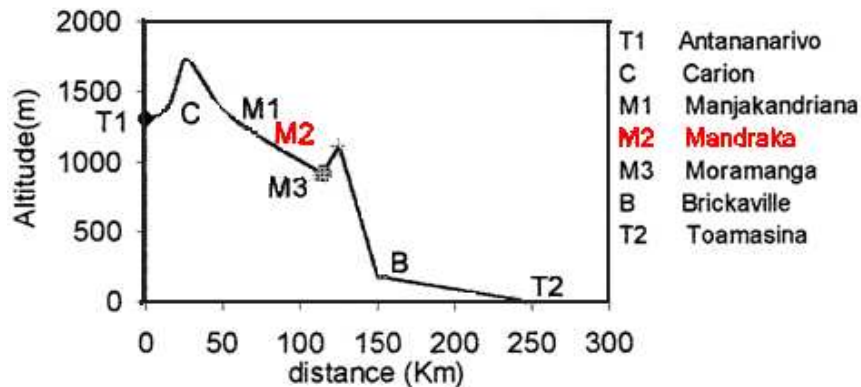


Figure n°4 : Profil topographique Antananarivo - Toamasina  
Source : LEEMAN, 1989

Etant donné les modelés accidentés et les réseaux hydrographiques encaissés, les bas de pente sont pratiquement absents et la zone est caractérisée par des vallons très étroits formés des cônes de déjection (RAJOELISON *et al.*, 2007).

Ces modelés sont plutôt complexes du fait que la région présente des reliefs à « multiface » appelés reliefs polyédriques (figure n°5). En général, deux types de forme de modelés dominent cette région à savoir les reliefs de dissection et les collines disséquées. Ils se ressemblent mais se différencient seulement par leurs grandeurs de sorte que les collines disséquées sont moins élevées que les reliefs de dissection et n'occupent qu'une superficie assez réduite dans la région (RAJOELISON *et al.*, 2007).

### 1.4. Pédologie

Le sol est à dominance ferrallitique et repose sur le socle ancien à migmatite granitoïde. De par ces caractères et la topographie très pentue, le type de sol dans cette région a tendance à se rajeunir. D'après ANDRIAMBOAVONJY (2001), les différents types de sols sous-cités, représentés sur la figure n°5, peuvent être rencontrés dans la région de Mandraka.

#### 1.4.1. Sol ferrallitique typique

Le sol ferrallitique typique à structure polyédrique est caractérisé par la présence d'un horizon B après l'horizon A, à texture argilo-limoneuse, à cohésion moyenne à forte et à structure polyédrique. Il résiste moyennement à l'érosion. Ce type de sol se trouve surtout sur les hauts versants avec des pentes moyennes.

#### 1.4.2. Sol ferrallitique rajeuni

Le sol ferrallitique rajeuni est identifié par la présence de la couche BC, un horizon limono-argileux et à structure polyédrique, directement en dessous de l'horizon A. Cet horizon est riche en minéraux et ne se situe qu'à faible profondeur. A cohésion moyenne, le sol est moyennement sensible à l'érosion. De ce fait, des sols tronqués où des couches humifères totalement décapées peuvent être observés.

#### 1.4.3. Sol ferrallitique fortement rajeuni

Le sol ferrallitique fortement rajeuni ou le sol ferrallitique pénévolué a un profil A sur CB. L'horizon d'altération se trouve à faible profondeur (moins de 60 cm) et les minéraux primaires plus ou moins altérés se distinguent facilement. L'horizon CB à structure continue, à texture sablo-limoneuse, à cohésion faible et à porosité élevée permet un bon enracinement mais rend le sol moins stable structuralement.

#### 1.4.4. Sol peu évolué

Le sol peu évolué a un profil A sur C. Ce sol se reconnaît facilement par les couleurs gris noir de la couche humifère et blanc brunâtre de l'horizon d'altération. La présence des éléments minéraux (ex : micas) facilement remarquables est l'une de ses particularités. Ce type de sol a une structure grumeleuse, une texture limono-sableuse (pauvre en argile), une cohésion faible, une porosité élevée et un bon enracinement. Cependant, il est très sensible à l'érosion.

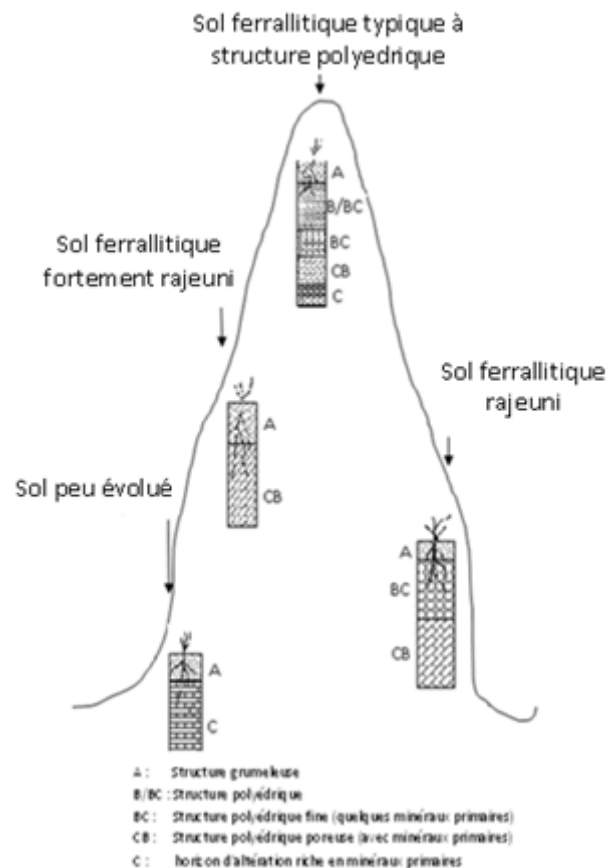


Figure n°5 : Toposéquence de sols sur les reliefs de dissection de la zone de Mandraka  
Source : RAJOELISON et al., 2007

## **1.5. Hydrographie**

Prenant source au lac Mantasoa avec un débit de 5 à 7m<sup>3</sup> par seconde, la rivière Mandraka qui contribue à l'alimentation du barrage hydroélectrique de la JIRAMA joue un rôle de conduite d'eau. En outre, les cours d'eau qui sillonnent les montagnes et les vallées de la région constituent une évacuation de l'eau issue des ruisseaux prenant source dans la forêt environnante et alimentent aussi cette rivière. Suite à l'intensité de pluie et à la quantité d'eau recueillie, le débit que donne cette rivière est remarquable et nécessite plus d'attention pour la JIRAMA.

## **2. Milieu biologique**

### **2.1. Flore et végétation**

Trois types de formation végétale ont été identifiés dans la région de Mandraka : la formation primaire, la formation secondaire après friche et la formation artificielle.

#### **2.1.1. Formation primaire**

La forêt naturelle reflète le type de forêt de la côte Est de Madagascar. Sous l'effet de l'Alizé apportant de l'humidité, elle garde sa verdure toute l'année. La composition floristique diffère des autres formations à cause du niveau d'altitude. Ainsi, le type de forêt y est qualifié de forêt dense humide de moyenne altitude.

La forêt offre sa splendeur par la présence de diverses espèces floristiques. Elle est pluristratifiée et toutes les strates sont présentes avec des espèces caractéristiques illustrées dans le tableau n°1. En effet, la strate supérieure est occupée par les familles HYPERICACEAE, PROTEACEAE, LOGANIACEAE, MORACEAE,... La strate moyenne est caractérisée par les familles RUBIACEAE, CUNONIACEAE, et EUPHORBIACEAE. La strate inférieure est constituée de palmiers et de régénérations d'espèces des strates précédentes. A cause de l'humidité durant toute l'année, les mousses et les lichens y sont très abondants et colonisent la strate muscinale.

Actuellement, les forêts primaires tendent à se dégrader et régressent en forêts secondaires dues aux actions anthropiques (défrichement, feux de végétation, ...).

#### **2.1.2. Formation secondaire ou « savoka »**

La formation secondaire s'installe après l'enlèvement de la formation originelle soumise à divers degrés de perturbation. En effet, après l'épuisement des terrains suite à quelques années de cultures, les formations secondaires prennent place sur des jachères.

Les espèces reconstituées sont les espèces pionnières de tempérament héliophile. Il s'agit d'*Harungana madagascariensis*, *Solanum sp.*, *Dombeya sp.*, *Trema orientalis*, *Psiadia sp.*, et *Macaranga sp.* Cependant, les espèces caractéristiques sont différentes selon le stade de dégradation du sol. Ainsi, *Philippia sp.*, *Agauria sp.* et *Helichrysum sp.* sont abondantes quand la dégradation atteint un stade plus avancé. Les graminées constituées d'*Aristida sp.*, *Impérata sp.*, *Hyparrhelitrum sp.* et *Rynhelitrum sp.* sont présentes au stade de dégradation « savane ».

Tableau n°1 : Listes des espèces caractéristiques des forêts naturelles

Forêt primaire		Forêt secondaire	
Espèces	Familles	Espèces	Familles
<i>Dichaethantera spp.</i>	MELASTOMATACEAE	<i>Acacia spp.</i>	MIMOSACEAE
<i>Dombeya spp.</i>	STERCULIACEAE	<i>Harungana madagascariensis</i>	CLUSIACEAE
<i>Eugenia spp.</i>	MYRTACEAE	<i>Lantana camara</i>	VERBENACEAE
<i>Ficus sp.</i>	MORACEAE	<i>Macaranga sp.</i>	EUPHORBIACEAE
<i>Ilex mitis</i>	AQUIFOLIACEAE	<i>Psiadia altissima</i>	MORACEAE
<i>Ocotea spp.</i>	LAURACEAE	<i>Trema orientalis</i>	ULMACEAE
<i>Tambourrissa trichophylla</i>	MONIMIACEAE		
<i>Uapaca sp.</i>	EUPHORBIACEAE		
<i>Weinmannia sp.</i>	CUNONIAEAE		

### 2.1.3. Formation artificielle.

La formation artificielle est composée surtout d'arboretum et de reboisement d'*Eucalyptus sp.* des propriétés privées. Dans la station forestière de la Mandraka, l'arboretum est constitué de 49 espèces exotiques et de 2 espèces autochtones plantées vers 1950. Ce sont des résineux et des feuillus.

Sur les terrains domaniaux en dehors de l'arboretum, des plantations privées d'*Eucalyptus sp.* sont les plus rencontrées sur les hautes collines ou sur ses parties amont. Elles sont destinées au charbonnage.

## 2.2. Faune

Les inventaires réalisés à Mandraka ont montré une diversité élevée notamment au niveau de l'avifaune recensée à environ 62 espèces. D'autres groupes fauniques ont été également inventoriés comme Reptiles (31 espèces), Batraciens (31 espèces) et Mammifères (13 espèces) (RATSIRARSON, 1999 in RAJAONARISOA, 2002).

La station forestière de Mandraka possède une richesse en biodiversité. Quatre espèces de lémuriens y ont été répertoriées ; *Eulemur fulvus*, *Avahi laniger*, *Hapalemur griseus* et *Microcebus rufus* lesquelles marquent surtout la valeur de cette station. Cependant, la diminution et la destruction de l'habitat naturel entraînent la disparition progressive de ces espèces. Entre autres, la forêt se fragmente actuellement sous forme d'îlots forestiers. Ce qui ne manquerait pas de menacer certaines espèces à cause du problème de consanguinité.

### 3. Milieu humain

#### 3.1. Démographie

##### 3.1.1. Historique et composition de la population

La population dans la région de Mandraka est formée par des migrants composés de différentes ethnies telles que le Merina, le Betsileo, le Betsimisaraka, le Bezanozano, .... La majeure partie de ces composantes sont venues des Hauts plateaux (Manjakandriana, Antananarivo, Ambatolampy, Antsirabe), en particulier les Merina. Les autres ethnies venant de Fianarantsoa, Tamatave, Manankara, etc. ne sont que minoritaires.

Les événements qui marquent l'installation des habitants dans cette région sont surtout la construction du chemin de fer reliant Antananarivo et Toamasina en 1907, puis l'installation du barrage hydroélectrique en 1955 et enfin la réhabilitation de la RN2 en 1992.

De ce fait, les migrants se sont installés à Mandraka en quittant leur localité d'origine pour leur subsistance. Les raisons pour lesquelles ces décisions ont été prises peuvent être la pression démographique et la faible productivité de leur terrain d'origine, l'attrait par la fertilité du sol à Mandraka et surtout la recherche des sources de revenu immédiat par l'intermédiaire des ressources forestières qui paraissaient abondantes à l'époque.

##### 3.1.2. Répartition de la population

Le Fokontany de Mandraka ne comprend que quatre hameaux à cause du regroupement des petits hameaux : Betavolo, Ankerana, Mandraka Ambany et Mandraka Centre. Il est à signaler que, récemment, Andasibe Avaratra est devenu un nouveau Fokontany en raison du nombre élevé de sa population.

La population compte 685 habitants inégalement repartis, à raison de 04 individus par ménage en moyenne. Ces habitants se répartissent dans 163 ménages dont la plupart se concentrent à Mandraka Centre (39% de la population).

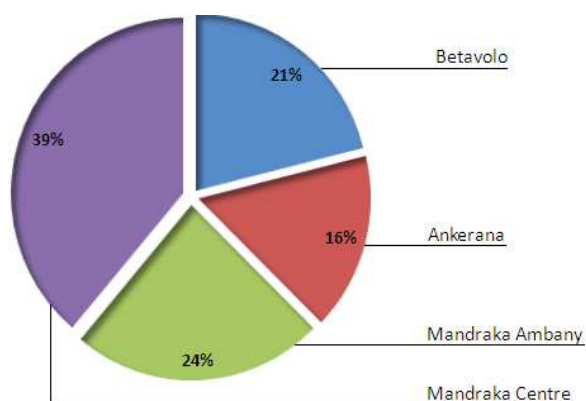


Figure n°6 : Répartition de la population par hameau  
Source : Fokontany Mandraka, 2008

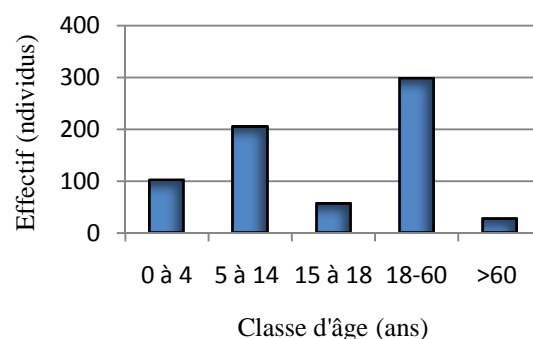


Figure n°7 : Répartition de la population par classe d'âge  
Source : Fokontany Mandraka, 2008

La population est jeune et très active (figure n°7). Cette caractéristique démographique est favorable aux exploitations des ressources forestières. Cependant, elle représente une menace pour la couverture forestière de la région qui serait sans doute exposée au problème d'érosion.

### **3.2. Activités économiques**

#### **3.2.1. Agriculture**

La population vit au dépens de la forêt et leurs principales sources de revenu proviennent de l'exploitation des produits forestiers. L'agriculture n'est qu'une activité secondaire à cause du relief fortement accidenté constituant une limite à l'exploitation agricole. D'autre part, il y a présence des espèces ravageuses « *Rattus rattus* » lesquelles détruisent presque la moitié de leur production notamment les céréales (riz, haricot...). Ce qui ne suscite pas la motivation de la population à s'investir dans l'agriculture. Par ailleurs, la population ne pratique guère la riziculture à cause de l'exiguïté des bas-fonds. De plus, la culture de riz pluvial n'a pas toujours réussi en raison de cette espèce nuisible.

La population exploite principalement les mi-versants pour pratiquer la culture des tubercules (manioc, patates douces,...), des céréales (maïs, riz,...), des légumineuses (haricot,...) et les bas de pente pour cultiver les cultures maraîchères (carotte, ...). Ces cultures sont parfois associées.

La méthode habituelle la plus pratiquée est la culture itinérante sur brûlis ou « tavy » qui consiste à défricher et à incinérer les couvertures végétales avant la plantation. Les cendres ainsi produites fertilisent le sol sans d'autre apport d'amendements. Cependant, cette technique favorise et accentue le phénomène d'érosion.

Malgré la variabilité climatique, la modification du calendrier cultural dans la région de Mandraka n'a pas été remarquée. Toutefois, certaines cultures ont été laissées suite à leurs mauvais rendements (cas de la pomme de terre). Les parcelles de culture se trouvent plutôt sur les bas de pente du fait que la quantité de pluie diminue et que la réserve en eau du sol en amont est insuffisante.

#### **3.2.2. Elevage**

L'élevage ne présente pas trop d'importance dans la région de Mandraka. C'est une activité peu développée dont les produits sont généralement destinés à l'autoconsommation. Les différentes spéculations sont notamment :

. L'aviculture : c'est une activité pratiquée par presque tous les ménages avec quelques cheptels. Elle ne constitue pas une source de revenu conséquente pour les paysans mais leur sert de secours en cas de difficultés financières. Le type d'élevage est encore traditionnel.

. L'élevage bovin : c'est un élevage auquel quelques familles seulement s'adonnent. Les bœufs sont utilisés pour transporter les produits agricoles ou pour transporter les bois exploités tandis que les vaches constituent une source journalière de revenu par leur produit laitier. L'élevage bovin est aussi utile pour produire de fumier pour l'agriculture.

. L'élevage porcin : c'est une activité qui permet à la famille de faire une économie. La famille engraisse un ou deux porcs pendant six mois pour les vendre après.

. La pisciculture : c'est un élevage qui est beaucoup plus amélioré actuellement grâce à l'intervention des projets de développement mené par le projet ESAPP. Sur les bas de pente, quelques ménages possèdent des bassins piscicoles où ils élèvent diverses espèces de poissons (*Tilapia nilotica*, *Cyprinus capria*,...).

. L'apiculture : c'est une activité rémunératrice très appréciée par les paysans. La technique utilisée est encore traditionnelle mais l'élevage commence à s'améliorer grâce à la formation apportée par certain projet tel que SAHA. Les ruches sont installées dans les forêts secondaires incluses dans leur périmètre de culture ou près de leur foyer.

### 3.2.3. Exploitation forestière

L'exploitation forestière destinée à la construction, aux divers ouvrages d'œuvre ou à la production des bois de chauffe et des charbons constitue l'une des principales activités des habitants dans la région de Mandraka. Presque tous les ménages la pratiquent du fait que cette activité procure rapidement du revenu et que les matières premières sont encore assez abondantes. Effectivement, la région fait partie des principaux fournisseurs de la ville d'Antananarivo en bois d'œuvre et en bois d'énergie.

L'exploitation des ressources forestières dans le domaine privé, sur une superficie de 9 000ha, fournit du travail à la majorité de la population. En effet, certaines familles ne vivent uniquement que de l'exploitation forestière en travaillant comme ouvrier journalier ou en produisant des charbons.

Toutefois, récemment (mars 2008), l'exploitation forestière dans ce domaine privé a été fermée. La Direction Générale de l'Environnement, des Eaux et Forêts et du Tourisme a retiré le permis d'exploitation. Il paraît qu'actuellement, l'exploitation des forêts naturelles ou « ala gasy » est interdite et seule l'exploitation des bois issus des reboisements est autorisée. Par conséquent, un grand nombre de la population dans la région de Mandraka se trouve sans travail suite à cette décision. Cette situation ne fait qu'accroître les actes de vols. Par ailleurs, en raison de l'insuffisance de moyens financiers et de l'insécurité de leur culture, les paysans ont eu recours à la pratique du « tavy » qui est une technique de culture facile à réaliser puisqu'elle ne demande que peu d'investissement. A cet effet, la situation devient de plus en plus alarmante vis-à-vis de l'érosion car l'utilisation de feu est encore plus dévastatrice qu'une simple exploitation forestière.



### 3.2.4. Typologie des activités

D'après l'étude menée par RAMAMONJISOA (2008), les revenus des ménages dans la région de Mandraka se répartissent comme suit :

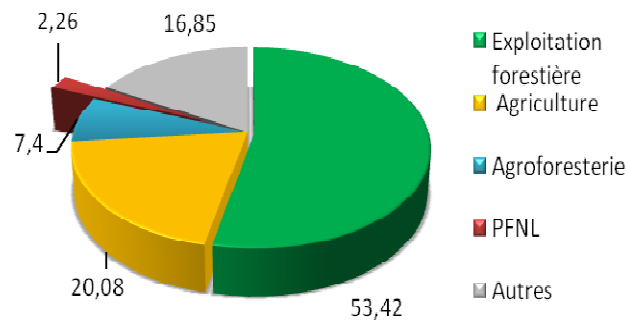


Figure n°8 : Différentes activités génératrices de revenu des ménages à Mandraka

Selon cette répartition, l'exploitation des ressources forestières génère le plus de revenu et elle constitue la principale activité de la population environnante. De ce fait, 73 % des ménages vivent au dépend de l'exploitation forestière, 8% seulement sont des Agriculteurs (RAMAMONJISOA, 2008).

\*\*\* § \*\*\*

Partie 2

*METHODOLOGIE D'ETUDE*



## **METHODOLOGIE D'ETUDE**

Liées au problème de départ, permettant de connaître s'il existe des interrelations entre les différents facteurs tels que le climat, la topographie, les caractéristiques des sols, le mode d'occupation des sols ainsi que l'érosion et de savoir lequel (lesquels) de ces paramètres est (sont) le(s) plus influent(s) sur l'érosion ? et à l'objectif assigné, consistant à déterminer les relations qui peuvent exister entre ces facteurs en vue de concevoir un aménagement rationnel pour la région de Mandraka, les méthodes adoptées pour la réalisation de cette étude ont été basées sur l'étude bibliographique, les enquêtes socio-économiques, les expérimentations et enfin le traitement et l'analyse des données.

### **1. Etude bibliographique**

L'étude bibliographique consiste à collecter le maximum d'informations pour bien fonder l'étude. Elle constitue une balise pour bien cerner le cadre du travail et pour assurer la logique de l'étude. Par ailleurs, elle permet de compléter les données manquantes ou non disponibles sur terrain.

Les recherches bibliographiques ont été surtout axées sur les données et les ouvrages relatifs à des études concernant les problèmes d'érosion et de ruissellement, les relations entre le sol, la végétation, la géomorphologie et le climat, la défense et restauration du sol ; les aménagements des bassins versants ainsi que la zone d'étude.

A cet effet, différents ouvrages ont été consultés dans des centres de documentation notamment le Centre d'Information et de Communication de l'ESSA-Forêts (CIC), la bibliothèque de l'ESSA, les centres de documentation du FOFIFA, CIDST, etc. La consultation des sites Internet a permis de compléter les données fournies par les ouvrages écrits.

### **2. Enquêtes socio-économiques**

Les enquêtes socio-économiques permettent de connaître les informations utiles concernant la zone d'étude et les activités de la population. A travers les entretiens auprès des personnes ressources liées ou non au projet, les informations collectées ont concerné surtout la composition de la population, leur mode de vie, leurs principales activités ainsi que l'historique des parcelles d'études choisies. Leur opinion et point de vue sur les nouvelles techniques de culture (utilisation des haies vives, terrassement, agroforesterie) pour la lutte contre l'érosion et l'amélioration de la qualité et de la quantité des produits agricoles ont paru intéressants afin d'améliorer ces techniques et d'apporter entre autres des innovations suivant leurs attentes.

Les questions semi-ouvertes ont été la méthode adoptée pour que les réponses ne soient pas trop limitées et que les informations recueillies soient de qualité et de quantité. Ces questions ont été variées suivant les enquêtés. Toutefois, elles ont été plus ou moins guidées selon les objectifs de l'enquête. L'échantillonnage s'est fait au hasard. Mais faute de temps disponible, seulement 28 ménages ont été enquêtés soit un taux de 17%. Bien qu'il soit inférieur au taux normal d'enquête, il est suffisant après une confrontation des informations récoltées avec les observations sur terrain.

Les personnes ressources ont été composées de :

- L'autorité administrative locale : Président du Fokontany ;
- Paysans pilotes du projet : 5 ménages ;
- Et paysans ordinaires (agriculteurs et/ou exploitants forestiers) : 22 ménages.

### **3. Expérimentations sur terrain**

L'étude sur le terrain s'est rapportée principalement sur l'érosion. Ainsi, les données collectées ont concerné surtout la quantité de pluie, la typologie des sols et les pertes en terre et le ruissellement sur les parcelles d'étude choisies.

#### ***3.1. Choix et mise en place des parcelles d'étude***

Afin de répondre aux questions posées dans la partie réservée à la problématique et de vérifier les hypothèses émises, chaque parcelle élémentaire doit tenir compte des critères prédéfinis ci-après :

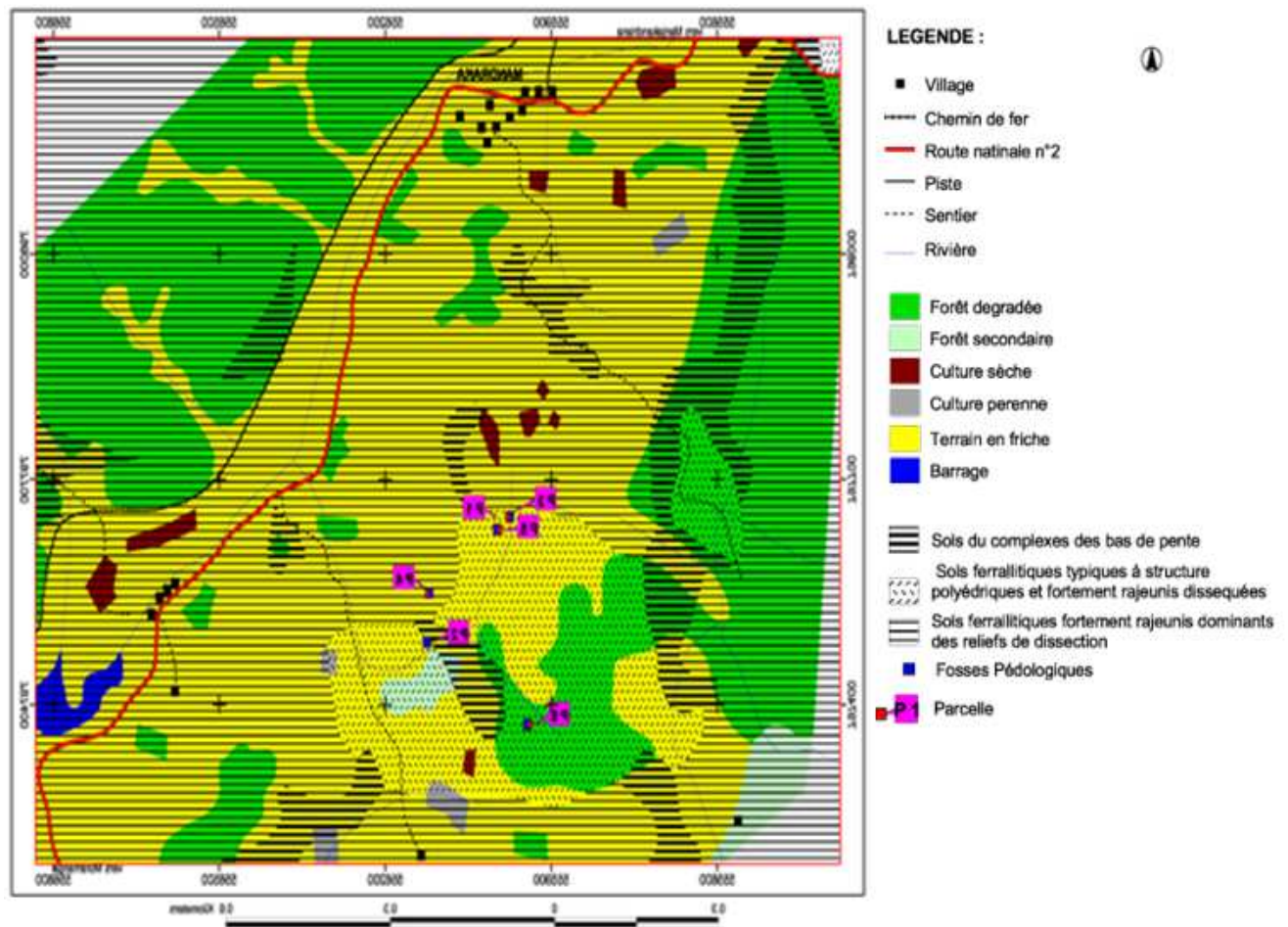
- avoir un mode d'occupation différent ;
- se trouver sur des pentes fortes avoisinant le 70% ;
- se situer sur le mi-versant ;
- être bien exposée au soleil.

D'après le mode d'occupation, 6 parcelles font l'objet de l'étude :

- PE1: parcelle élémentaire aménagée en terrasse de première année, présentant seulement un dispositif de lutte antiérosive mécanique (terrassement) ;
- PE2 : parcelle élémentaire aménagée en terrasse de deuxième année, présentant un dispositif de lutte antiérosive à la fois biologique (haie vive de *Vetiveria zizanoides*) et mécanique (terrassement) ;
- PE3 : parcelle élémentaire non aménagée en terrasse mais présentant un dispositif de lutte antiérosive seulement biologique avec des lignes de *Vetiveria zizanoides* plantées entre les cultures ;
- PE4 : parcelle élémentaire sous « tavy », illustrant le mode de culture traditionnel (manioc) ;
- PE5 : parcelle élémentaire sous « savoka », considérée comme une parcelle témoin ;
- PE6 : parcelle élémentaire sous forêt naturelle, considérée également comme une parcelle témoin.

Chaque site d'étude est caractérisé par des paramètres situationnels tels que les coordonnées géographiques (par un GPS), la pente (estimée avec un clisimètre) et l'exposition par rapport au soleil (boussole). La matérialisation des parcelles élémentaires nécessite l'utilisation d'une chevillière pour la mesure de dimension, d'une boussole pour l'orientation de la parcelle et des cordes pour l'alignement des planches de délimitation.

La cartographie ci-après illustre la localisation de ces parcelles élémentaires suivant le type de sol et leur mode d'occupation.



Carte n°2 : Carte de localisation des parcelles d'étude (Données GPS : Auteur)

Les données recueillies, notamment les coordonnées géographiques, ont été portées sur cette carte qui est la résultante de la superposition de la carte d'occupation du sol en 1987 et de la carte pédomorphologique de la Mandraka (RAJOELISON et al., 2007).

### 3.2. Mesure de la pluviosité

La mesure de la pluviosité permet de quantifier le niveau de pertes en terre et de ruissellement. Les matériels de mesure de la précipitation ont été composés d'un cube récepteur à ciel ouvert placé à 1,5m du sol pour le stockage de l'eau de pluie et d'un pluviomètre gradué en mm de pluie par 400cm<sup>2</sup> pour la mesure de la hauteur de pluie. La mesure a été réalisée au jour le jour. La journée de 24h a été comptée à partir de 6h du matin à 6h du jour suivant. Lors d'un orage dans une journée, la durée de cette pluie a été comptée et la quantité de la précipitation correspondante a été mesurée.

### 3.3. Description du profil pédologique

L'objectif de l'examen du profil pédologique est de décrire les différentes couches (ou horizons) du profil et de classer le sol d'après son type pédologique.



*Cliché n°01 : Fosse pédologique pour l'examen du profil (Auteur)*

Une fosse pédologique de 1m x 1m x 1m a été ouverte près ou sur le même flanc de chaque parcelle élémentaire. Elle a permis d'observer et de caractériser le type des sols, horizon par horizon. L'examen a porté notamment sur l'épaisseur, la couleur, la texture, la structure, la cohésion, la porosité, la perméabilité, l'enracinement, la présence des activités biologiques (vers de terre, autres insectes,...) et les transitions entre les différentes couches. Il est à noter que le code MUNSELL constitue la référence pour la détermination des couleurs.

Les données descriptives collectées sur terrain ont été confrontées avec les résultats des analyses au laboratoire pour constituer des témoins et servir de référence pour chaque parcelle.

### 3.4. Collecte et mesure des pertes en terre et du ruissellement

Les pertes en terre et les quantités des eaux ruisselées collectées dans chaque parcelle élémentaire ont permis d'évaluer l'intensité de l'érosion suivant le mode d'occupation du sol.

La méthode adoptée consiste à installer un groupe de dispositif permettant de recueillir les pertes en terre et les eaux de ruissellement. Chaque parcelle élémentaire a été, en effet, délimitée par des planches à moitié enfoncée dans le sol pour matérialiser sa surface. A la limite en aval, les eaux de ruissellement ainsi que les particules de terres entraînées sont collectées par un canal collecteur et/ou un piège à sédiments.

Ce dernier est tapissé d'une toile en plastique imperméable qui les conduit vers un dispositif de stockage constitué par :

- Un court canal d'adduction vers la première cuve ;
- 02 cuves réceptrices métalliques reliées par un autre canal d'amenée.



*Cliché n°02 : Dispositif pour le stockage des pertes en terre et des pertes en eau (Auteur)*

Les terres entraînées après chaque pluie ont été prélevées et pesées à l'état humide à l'aide d'une balance. C'est la quantité de terres perdues en fonction de la hauteur de pluie. De même, le ruissellement a été quantifié par un appareil de mesure de volume, ce qui a permis de ressortir la capacité d'infiltration du sol.

Afin de limiter le nombre de dispositifs de stockage (cuves), deux compartiments ont été reliés par un partiteur présentant des fentes (9 ou 12) dont l'un alimente la deuxième cuve. Pour calculer les volumes d'eau recueillis, la quantité d'eau dans la deuxième cuve a été multipliée par le nombre des fentes avant de l'additionner avec la quantité dans la première (CTFT, 1989).

$$V_{\text{totale}} = V_{\text{dans la 1ère cuve}} + (\text{nombre fente} \times V_{\text{dans la 2ème cuve}})$$

### ***3.5. Prélèvement d'échantillons du sol pour l'analyse au laboratoire***

Les échantillons prélevés ont permis de réaliser l'état de référence des parcelles élémentaires sur les compositions granulométriques, les MO stockées et les C séquestrés dans le sol ainsi que sur l'évaluation des pertes en C et en MO par l'érosion.



Trois échantillons par parcelle élémentaire ont été prélevés pour l'analyse au laboratoire. Il s'agit des échantillons de la couche A (0 à 10cm), de la couche B (15 à 30cm) et des pertes en terre durant la pluviosité maximale. Pour la couche A, le prélèvement s'est fait tout au long de la diagonale pour l'homogénéité de l'échantillon et pour la représentativité de la parcelle, tandis que pour la couche B, il a été réalisé seulement au niveau de la fosse pédologique.

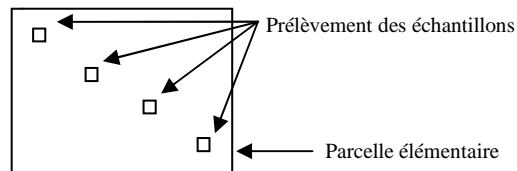


Figure n° 9 : Prélèvement des échantillons (couche A) suivant la diagonale  
Selon la méthode de BOURGEAT

### 3.6. Densité apparente

La densité apparente du sol de chaque parcelle élémentaire permet de ramener la quantité de la couche érodée t/ha/an en mm/an, selon le rapport suivant :

$$H = \frac{Ps}{Da \times S}$$

Da : densité apparente (g/cm<sup>3</sup>)

H : hauteur (exprimée en cm puis ramenée en mm)

Ps : poids du sol séché à l'étuve (g)

S : surface de la parcelle élémentaire (cm<sup>2</sup>)



Cliché n°03 : Cylindre métallique pour la  
mesure de la densité apparente (Auteur)

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la Da. Parmi tant d'autres figurent la méthode au sable, la méthode au cylindre, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie.

Au cours de cette étude, la méthode au cylindre métallique a été adoptée étant donné qu'elle est facile à manier et ne demande pas de matériels trop sophistiqués. Cette méthode consiste à enfoncer dans le sol non perturbé, avec précaution, un cylindre en acier à bord tranchant de volume connu (100cm<sup>3</sup>) et à le retirer avec son contenu (YORO et GODO, 1990 ; RANDRIAMBOAVONJY, 1998). Un volume de sol apparent est obtenu. Le rapport de la masse volumique de la terre après l'avoir séchée à l'étuve (g) et son volume à l'état humide (cm<sup>3</sup>) donne la valeur de la densité apparente (g/cm<sup>3</sup>) (LOTEZ et MARTHIEU, 1990).



## 4. Analyse au laboratoire

L'analyse au laboratoire a permis de déterminer le taux des éléments et des particules contenus dans le sol. Le pH, l'azote (N), le carbone organique (C), la granulométrie et les éléments pour définir l'indice d'instabilité (Is) de sol ont été les éléments à déterminer.

Les valeurs de N et de C permettent d'évoquer le rapport C/N qui permet d'apprécier l'évolution de la décomposition des MO. La granulométrie sert à compléter les observations sur terrain, à chiffrer les proportions de sable, de limon et d'argile et à en définir la stabilité structurale du sol. Les détails de la manipulation et de la mensuration sont présentés en ANNEXE 2.

### 4.1. Analyse granulométrique

La connaissance de la proportion des particules : sable, argile et limon permet d'apprécier la texture du sol et de compléter les observations effectuées sur terrain.

La méthode adoptée pour l'analyse granulométrique a recouru à la loi de Stock (RANDRIAMBOAVONJY, 1998). Il s'agit de déterminer les proportions en sable, en argile et en limon par gravitation (différence de gravitation de chaque particule). Elle a consisté à disperser les agrégats du sol par une solution d'Hexamétaphosphate de sodium à 50g par litre après l'avoir traité par l' $H_2O_2$  et à déterminer la proportion des particules à l'aide des tamis et de la pipette de Robinson.

### 4.2. $pH_{eau}$

Le niveau de l'acidité ou de la basicité du sol a été mesuré avec le pH-mètre. Le pH permet de définir le type d'humus produit qui participe à la stabilité structurale du sol. Il influe aussi sur la disponibilité en éléments nutritifs pour la croissance et pour le développement des plantes.

Le  $pH_{eau}$  et le  $pH_{KCl}$  sont les pH du sol couramment utilisés. Mais dans cette étude, seul le  $pH_{eau}$  a été déterminé car il peut donner la valeur dont on a besoin. Le sol est alcalin quand son pH est supérieur à 7 et il est acide quand son pH est inférieur à 7. Un pH de 7,0 définit un sol neutre.

### 4.3. Analyse du carbone et de l'azote

Cette analyse permet de déterminer respectivement le taux d'azote (N) et de carbone (C) du sol. Les valeurs servent à déterminer le rapport C/N qui donne un indice sur l'évolution de la décomposition des MO. La teneur en MO peut être estimée à partir de la teneur du C.

#### 4.3.1. Méthode d'analyse du carbone

La méthode adoptée pour le dosage du carbone fait appel à la théorie de WALKLEY et BLACK. Elle consiste à oxyder à chaud la MO contenue dans la terre par un oxydant puissant de bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en excès et en milieu sulfurique puis à titrer en retour le bichromate de potassium en excès par la solution de sel ferreux (sel de Mohr). Autrement dit, le bichromate de potassium est dosé en retour à l'aide de sel de Mohr. Pour le dosage, on s'est reporté au dosage du fer ferreux par le bichromate de potassium (RANDRIAMBOAVONJY, 1998).

Pour le mode opératoire, deux opérations ont été réalisées. Le premier consiste à l'étalonnage du sel de Mohr afin de déterminer la quantité d'oxydant qui réagit avec le réducteur. Cette opération est nécessaire du fait que le sel de Mohr est une solution instable et même la normalité de cette solution peut varier quelques heures après sa préparation. Le second concerne le dosage de C proprement dit tel qu'en présence d'un indicateur, la neutralisation est obtenue quand la couleur de la solution vire du vert au violet franc.

Pour le mode de calcul, théoriquement 1ml de solution de bichromate correspond à 3mg de C organique. Par contre, étant donné que l'oxydation du C n'est pas complète, la proportion de C oxydé est sensiblement constante et ne représente environ que 77% du carbone total, ainsi :

$$1\text{ml de K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 3,9 \text{ mg de C organique}$$

Et comme le dosage de C représente 55% de la MO totale (RANDRIAMBOAVONJY, 1998), C permet donc d'évaluer la teneur en MO du sol par règle de trois :

$$\text{MO}\% = 100/55\text{C}\%$$

#### 4.3.2. Méthode d'analyse de l'azote

Le dosage de l'azote total, à son tour, fait appel à la méthode de « Kjeldahl » dont la manipulation consiste à minéraliser les MO du sol par l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentré. La minéralisation permet de transformer l'azote organique en azote minéral. En effet, le dosage avec cet acide détruit le MO pour que le C puisse se dégager sous forme de  $\text{CO}_2$ , l'hydrogène s'évapore sous forme de  $\text{H}_2\text{O}$  et l'azote reste en solution sous forme de sulfate d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Il a été réalisé au moyen d'un appareil de distillation classique (RANDRIAMBOAVONJY, 1998).

L'opération s'est effectuée sous la hotte avec des matières de Kjeldahl, munie d'entonnoir. L'ébullition doit être régulière et douce afin que les vapeurs sulfuriques ne distillent pas hors du col de la fiole. Quand les fumées blanches de  $\text{SO}_2$  apparaissent, l'évaporation de l'eau est terminée, la liqueur brunit et devient incolore. 1ml d'acide sulfurique N/10 correspond à 1,4mg d'azote.

### 4.4. Evaluation de la stabilité du sol

L'indice d'instabilité (Is) et l'indice d'érodabilité (K) sont les indicateurs de référence pour estimer l'état de la stabilité du sol de la région de Mandraka et celui des parcelles d'étude (Cf. ANNEXE 3).

#### 4.4.1. Indice d'érodabilité K

L'indice d'érodabilité K est déterminé par le nomographe de Wishmeier (1971). Il tient compte de la perméabilité, de la structure, du taux de MO, et des proportions de limon et de sable du sol (ROOSE, 1991).

Le tableau n°2 suivant permet de classer l'érodabilité du sol suivant la valeur de K (FAO, 1986 in ANDRIAMBOAVONJY, 2001).

Tableau n°2 : Classification de l'érodabilité du sol

Valeur de K	Erodabilité du sol
K = 0,05	Très peu érodable
0,05 à 0,1	Faiblement érodable
0,1 à 0,2	Moyennement érodable
0,2 à 0,4	Fortement érodable
0,4 à 0,6	Très fortement érodable

#### 4.4.2. Indice d'instabilité Is

L'indice d'instabilité (Is) permet de chiffrer la stabilité des agrégats du sol. D'après le protocole proposé par Hénin, l'Is est obtenu à partir de la formule ci-après (RANDRIAMBOAVONJY, 1998 ; CTFT, 1989).

$$Is = \frac{(A + L) \text{ en } \%}{\text{Agrégats} - 0,9 \text{ SG en } \%}$$

Avec le traitement du sol par divers agents dispersants tels que l'eau, l'alcool et le benzène ; A, L et SG représentent respectivement le pourcentage d'argiles, de limons et de sables grossiers dans les agrégats. Pour Is, plus la valeur est grande, plus la stabilité est faible.

Pour Is, la distinction de la proportion d'agrégats avec les particules peut être biaisée par manque de loupe binoculaire. Pour K, l'équation proposée par Wishmeier *et al* en 1971, se basant sur des pentes de 9%, ne considère pas la rugosité de la pente sur laquelle la turbulence du ruissellement rend instable le sol (ROOSE, 1991).

## 5. Traitement et analyse des données

Les données de mesure sur terrain telles que la précipitation, les pertes en terre et le ruissellement et les résultats des analyses au laboratoire ont été prétraités à l'aide du logiciel Microsoft Excel pour qu'ils soient bien agencés et ordonnés. Ils ont été portés ensuite sur les logiciels STATISTICA 5.1 et XLSTAT 6.0 pour être traités. Le but consiste à ressortir l'interrelation entre la quantité des MO, le rapport C/N, la densité apparente, l'exposition, la pente, les fractions de la texture, l'érosion et le ruissellement suivant les différents modes d'occupation du sol.

Avant de réaliser les tests d'égalité de moyennes et les tests de corrélation entre deux ou plusieurs variables, un test de la distribution suivant la loi normale et un test d'égalité de variance (test de Leven) ont été effectués pour les variables indépendantes. En ce sens que les variables suivent la distribution normale et/ou ont des variances égales (homogènes), le test adopté est le test paramétrique. Pour le cas échéant, ce sera le test non paramétrique.

La prise de décision s'est faite à un niveau de confiance de 95%. Si la valeur de P est inférieure ou égale au seuil de probabilité  $\alpha = 5\%$ , l'hypothèse nulle, qui signifie qu'il y a absence de différence significative ou absence de corrélation significative entre les variables, est rejetée.

### ***5.1. Test d'égalité de moyenne***

Le test d'égalité des moyennes permet d'identifier statistiquement l'existence ou non d'une différence significative entre la moyenne de deux ou plusieurs populations. Le test T de Student est adopté pour la comparaison de moyennes de deux échantillons appariés et à variances égales : cas de la comparaison de moyennes de pluie dans la région de Mandraka entre 1950 à 1980 et 1992 à 2007. Pourtant, le test U de Mann Whitney est utilisé quand les échantillons sont indépendants et les observations ne suivent pas la distribution normale : cas de la comparaison de moyennes des pertes en terre et de moyennes des ruissellements sur les parcelles élémentaires.

### ***5.2. Test de corrélation***

Le test de corrélation permet d'identifier le niveau d'interrelations entre les variables. Il est déterminé par la valeur de P et du coefficient de corrélation R. Le test paramétrique de Pearson est indiqué quand les variables suivent la distribution normale et ont une variance égale. Dans le cas contraire, il s'agit de procéder au test non paramétrique de Spearman.

D'une manière générale, la valeur du coefficient de corrélation R indique le degré de corrélation entre les variables. R est égal à « -1 » ou « 1 » quand il y a une parfaite corrélation respectivement négative ou positive, à « 0 » si les variables sont indépendants les uns des autres.

### ***5.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)***

L'ACP, qui est une méthode très efficace pour l'analyse des données quantitatives, permet de visualiser et d'analyser la répartition et la corrélation entre les variables. Dans cette étude, les variables ont été regroupées suivant les caractères externes et internes de chaque parcelle élémentaire pour pouvoir évaluer la résistance du sol vis-à-vis de l'érosion.

Suivant la variation de la quantité de pluie, le mode d'occupation du sol et la topographie constituent les caractères externes pour le jugement de la résistance des parcelles au phénomène d'érosion. Les caractéristiques du sol forment à leur tour les caractères internes.

Les variables de ces caractères sont ensuite visualisés. Par la suite, leurs interrelations avec les pertes en terre et le ruissellement ont été analysées. La représentation graphique de l'ACP permet en effet de synthétiser les résultats de l'étude. Le niveau de corrélation entre ces facteurs est aussi mis en relief avec cette analyse afin de vérifier ensuite les critères qui influent le plus sur le problème d'érosion de chaque parcelle élémentaire.

## 6. Synthèse de la démarche méthodologique

La démarche méthodologique adoptée au cours de cette étude se résume dans la figure suivante.

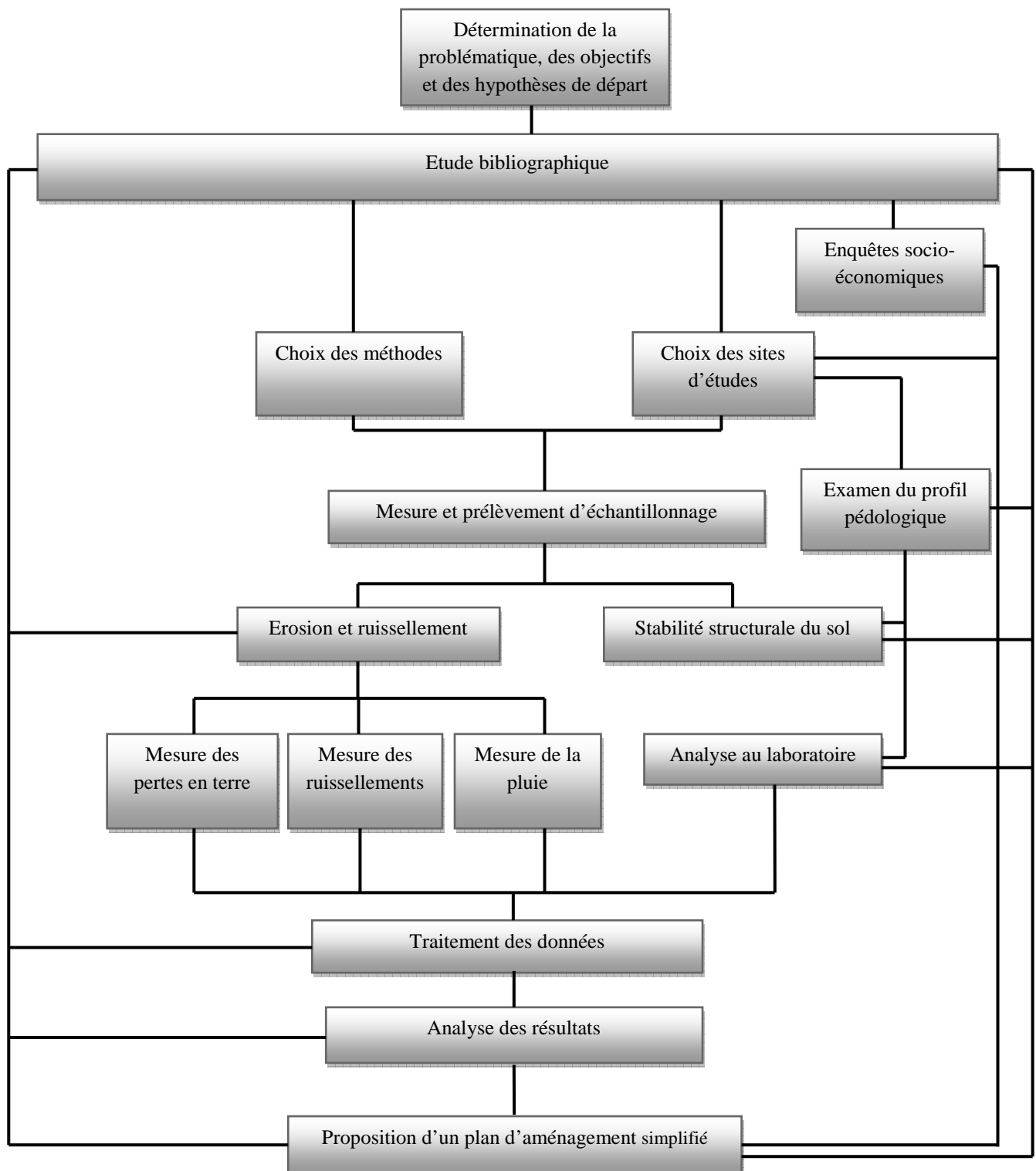


Figure n°10 : Synthèse de la démarche méthodologique

## **7. Limites et contraintes de l'étude**

Les limites et les contraintes du travail ont porté surtout sur :

- Le manque de temps : le prélèvement des pertes en terre et des ruissellements n'a pas été effectué dès le début de la période de pluie. De ce fait, les données collectées pendant les derniers moments de pluie durant lesquels les pluies sont torrentielles ne sont que partielles.
- Le coût d'analyse trop élevé : à cause de l'insuffisance des réactifs d'analyse et du coût élevé de l'expérimentation au laboratoire, les éléments analysés ont été limités. Entre autres, l'analyse de certains éléments chimiques ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$ ) du sol qui permettent la structuration du sol n'a pas pu être réalisée.
- L'insuffisance des données climatiques de la région de Mandraka : la JIRAMA fait la collecte des données climatiques dans cette région. Cependant, seules les données sur la pluviométrie sont disponibles car la détérioration du thermomètre n'a pas permis d'avoir celles de la température. De plus, certaines archives de données sont introuvables.
- L'éboulement des talus des parcelles : la présence des éboulements sur les talus peut augmenter le biais des données, même s'ils sont déjà considérés et enlevés (par estimation) dans les pertes en terre.

\*\*\* § \*\*\*

Partie 3

*RESULTATS*  
*ET INTERPRETATIONS*

*P*

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 1. Généralités

#### 1.1. Sol

##### 1.1.1. Texture

La texture est une indication de la composition granulométrique du sol. Elle correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur, ce qui est indépendant de la nature et de la composition de ces minéraux. (RANDRIAMBOAVONJY, 1997)

La fraction minérale est classée de façon suivante en fonction de leur diamètre (DUCHAUFOR, 1984 in RAJOELINA, 2007)

- Cailloux et graviers :  $\varnothing > 2\text{mm}$  ;
- Sables :  $\varnothing = 50\mu\text{m}$  à  $2\text{mm}$  (grossiers :  $0,2\text{mm}$  à  $2\text{mm}$  ; fins :  $50\mu\text{m}$  à  $0,2\text{mm}$ ) ;
- Limons :  $\varnothing = 2\mu\text{m}$  à  $50\mu\text{m}$  (grossiers :  $20\mu\text{m}$  à  $50\mu\text{m}$  ; fins :  $2\mu\text{m}$  à  $20\mu\text{m}$ ) ;
- Fraction fine ou argile :  $\varnothing < 2\mu\text{m}$ .

Le triangle texturale donne une identification graphique des textures issues de la composition granulométrique du sol. Suivant la proportion de sable, de limon et d'argile, le sol est divisé en classes de textures auxquelles correspond une appellation (Cf. ANNEXE 4).

##### 1.1.2. Structure

La structure est l'arrangement et le mode d'assemblage des différentes particules granulométriques du sol pour constituer des agrégats (RANDRIAMBOAVONJY, 1997). Ces particules s'associent entre elles de telle sorte que les sables et les limons jouent un rôle de squelette et les argiles avec les MO tiennent le rôle de ciment. D'une part, cette structure est caractérisée par (i) la forme et la taille des mottes<sup>3</sup>, (ii) la cohésion ou la résistance des mottes à la rupture et (iii) la porosité ou les pores occupées par les gaz et les liquides. D'autre part, elle forme l'ensemble des propriétés physiques fondamentales du sol dont la porosité exprime son état actuel et en donne les indications essentielles.

Les propriétés physiques et chimiques du sol sont en liaison étroite avec sa texture et sa structure qui se présentent comme deux facteurs-clés de la fertilité du sol. Ces deux facteurs permettent d'approfondir les propriétés fonctionnelles du sol. Une structure stable et une texture bien équilibrée favorisent la résistance du sol face à l'érosion.

---

<sup>3</sup> Mottes : un bloc de terre par l'assemblage des agrégats.



### 1.1.3. Matière organique (MO) du sol

Les MO du sol proviennent principalement de la décomposition des résidus végétaux et animaux par les micro-organismes (bactéries ou champignons) dans le sol. Elles sont composées aussi bien de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote que de phosphore, de calcium, de soufre et d'oligo-éléments.

Les MO peuvent être classées selon leur stade d'évolution : (i) les MOF ou les MO libres, souvent visibles, caractérisées par les résidus végétaux et animaux peu évolués ; (ii) l'humus, une forme plus évoluée et plus stable des MO; et (iii) les produits transitoires constitués de substances issues d'une première décomposition rapide des MOF.

Pour certain cas à Mandraka où le sol est à dominance de fraction sableuse, les MO, plus particulièrement l'humus, peut substituer le rôle de l'argile lequel permet (i) une augmentation de la rétention d'eau et des éléments minéraux; (ii) une fixation des ions positifs; (iii) une augmentation de la capacité d'échange cationique (donc l'amélioration de l'alimentation de la plante) et (iv) une meilleure cohésion des agrégats (amélioration structurale du sol) (DAMIEN, 1990). Cependant, l'humus peut évoluer et se transformer lentement en éléments minéraux quand les conditions existantes (climatique, physico-chimiques du sol) le déstabilisent.

En outre, par un pont calcique et/ou un pont ferrique lesquels assurent la floculation des argiles, l'humus et l'argile s'associent et forment ensemble un ciment qui, avec les autres constituants du sol, permet la formation des agrégats stables résistants à l'érosion et moins sensibles à la battance de pluie. Ainsi, la présence de l'humus dans le sol augmente la résistance du sol face à l'érosion. Plus les MO du sol sont importantes, moins le sol est érodable et instable.

### 1.1.4. Rapport C/N

Lors de la minéralisation, une prolifération de micro-organismes et une libération d'eau, de gaz carbonique, et d'énergie ont été marquées. Les fortes concentrations en carbone provoquent une forte multiplication des micro-organismes lesquels ont besoin d'Azote pour la minéralisation des MO. Le rapport C/N permet alors d'apprécier la vitesse de minéralisation des MO du sol. Plus ce rapport est bas, plus la minéralisation des MO du sol est importante (riche en azote) car la décomposition des MOF est rapide.

Un rapport C/N inférieur ou égale à 10 explique la bonne évolution des MO et un rapport C/N supérieur à cette valeur exprime une accumulation dans le sol des MO peu évolués (DAMIEN, 1990). Si la valeur de C/N est égale à 1 ou à 2, c'est de l'azote inactif fixé à de l'argile sous forme d'ammonium et non de l'azote organique (RANDRIAMBOAVONJY, 1998).

Tableau n°3 : Indice d'appréciation du rapport C/N

Rapport C/N	Appréciation
Sup à 25	Très fort
15 à 25	Fort
10 à 15	Moyen
08 à 10	Bas
Inf à 08	Très bas

Source : RANDRIAMBOAVONJY, 1998

## 1.2. Erosion hydrique

### 1.2.1. Définitions

L'érosion est définie comme l'ensemble des phénomènes qui contribuent à user la surface du globe et dont la progressivité agit par l'altération de la surface d'une part et le transport de ces matériaux altérés d'autre part (CTFT, 1989).

L'érosion hydrique est la résultante du décapement de la partie superficielle du sol dont l'eau de pluie est la principale cause.

### 1.2.2. Différentes formes d'érosion hydrique dans la région de Mandraka

#### 1.2.2.1. Erosion en nappe ou stade initial de l'érosion hydrique

L'érosion en nappe, qui est l'arrachement plus ou moins uniforme d'une couche mince du sol, constitue la résultante de l'écoulement d'un mélange d'eau et de terre comme une nappe le long de la pente. La quantité érodée du sol pour une année paraît insignifiante.

L'érosion en nappe se manifeste sur les terrains de culture où le sol est plus ou moins exposé à la battance de pluie. Aussi, elle peut être présente sur des terrains en première année de jachère.

#### 1.2.2.2. Erosion en griffe ou ruissellement en rigole

L'érosion en griffe ou en rigole est la première forme d'érosion linéaire. Elle se présente sous forme de petits canaux longeant la pente du terrain. Les rigoles ont une profondeur comprise entre 1 à 10cm et dont la largeur est fonction de la structure du sol et de l'intensité du ruissellement. L'apparition de cette forme d'érosion est due à la mauvaise exploitation du terrain.

#### 1.2.2.3. Erosion en ravine

L'érosion en ravine est une forme d'érosion où la profondeur des creux dépasse 50cm avec des dimensions variables. Elle intéresse les couches arables et les couches plus profondes. Les ravines se présentent sous deux formes dont la grandeur les différencie. D'une part, les petites ravines dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et/ou arbustive et, d'autre part, les grandes ravines qui s'étalent sur plusieurs mètres. La forme particulière de cette érosion est le « lavaka » quand elle atteint le stade ultime.

#### 1.2.2.4. Erosion en masse

L'érosion en masse est le déplacement en masse de terre suivant un plan de glissement où l'eau agit, non par décapage, mais par détérioration des qualités physiques en profondeur. Elle résulte ainsi soit des glissements de terrain, soit des décrochements. Ce type d'érosion se rencontre surtout sur les talus du bord de route de la RN2, surtout entre Ambatolaona et Moramanga.



*Cliché n°04 et n°05 : Manifestations de l'érosion en nappe sur une parcelle de culture avec un développement de l'érosion en griffe ou en rigole (Auteur)*

#### 1.2.3. Différents effets d'érosion

##### 1.2.3.1. Sur les éléments nutritifs du sol

L'érosion entraîne les éléments mis en suspension et les éléments en solution qui sont en général riches en éléments minéraux. Aussi, les pertes en terre entraînées par le ruissellement s'accompagnent-elles par des pertes en éléments fertilisants. Ce fait est prouvé par la présence des terrains fertiles en aval quand les terrains en amont sont érodés.

##### 1.2.3.2. Sur le profil et le modelé

Le degré d'érosion se différencie suivant le profil topographique. L'effet de l'érosion est différent sur le sommet, sur le versant et sur le bas de pente. Il est fonction de l'intensité et de la turbulence du ruissellement, de la pente et de la couverture végétale.

La résultante de l'érosion sur le profil et le modelé peut se présenter par la modification du profil pédologique due à l'entraînement des particules grossières et des éléments colloïdaux vers le bas du profil et à l'apparition des affleurements de roche.

### 1.2.3.3. Autres effets

Le charriage des particules de sol vers l'aval entraîne souvent l'ensablement des terrains de cultures en bas de pente. Suite aux sélections des particules minérales entraînées par les ruissellements, ce sont principalement les éléments grossiers qui sont déposés sur les bas de pente et provoquent leur ensablement. Ce fait conduit en effet à une diminution de la fertilité du sol et même une perte de surface cultivable.

En outre, l'aggravation des phénomènes d'érosion et de ruissellement dans les parties hautes entraîne, au niveau des bas fonds, l'envasement des terrains, le colmatage des barrages, la détérioration du régime des cours d'eau qui par conséquent deviennent torrentiels et causent différents dégâts.

## 1.2.4. Techniques de lutte antiérosive pratiquées à Mandraka

### 1.2.4.1. Technique traditionnelle

Face au problème d'érosion dans la région, les paysans utilisent des canaux de protection en amont des parcelles de culture (mode de culture traditionnelle) afin de limiter les effets de l'érosion par diminution progressive de la vitesse de ruissellement. De plus, ces canaux, connus sous le nom de « tatatra », sont aussi utilisés pour dévier la direction des ruissellements afin de ne pas aggraver les parcelles de culture. Cependant, cette technique a des limites et pourrait donner naissance à la formation de l'érosion en ravine.

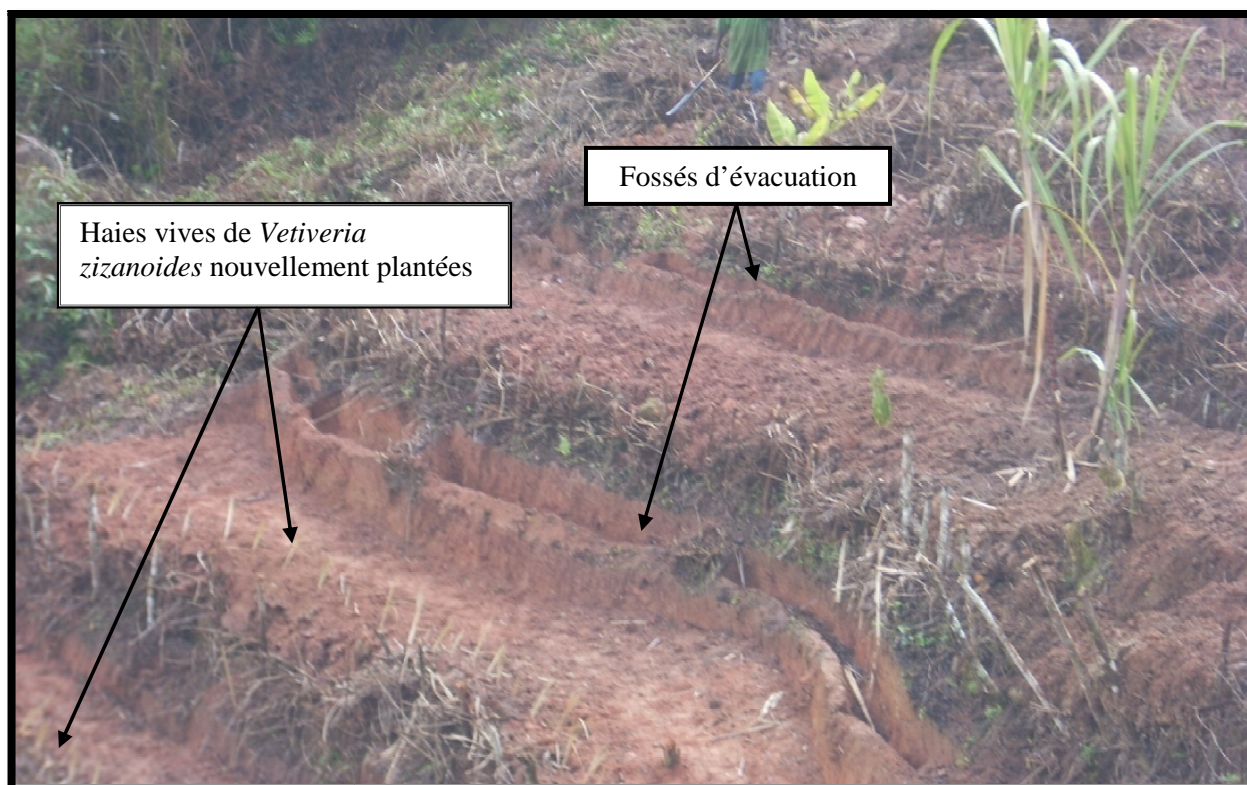
Actuellement, à l'instar des techniques de lutte antiérosive par terrassement, permettant de tenir les remblais par les fascines, les paysans mettent de gros bois en général pour empêcher l'entraînement des terres par l'érosion (Cf. Cliché n°5).

### 1.2.4.2. Aménagement des terrains marginaux en terrasse

La pratique du terrassement fût une méthode de lutte antiérosive mécanique appliquée aux terrains marginaux. Après l'exploitation des terrains pentus, la valorisation à long terme de ceux-ci demande des travaux qui permettent d'amoindrir les effets de l'érosion et surtout l'intensité du ruissellement.

La technique de lutte antiérosive adoptée consiste à aménager les terrains en terrasse suivant les courbes de niveau et à installer des fossés d'évacuation. Pour stabiliser les talus et pour canaliser l'eau vers le lieu d'écoulement, des haies vives constituées par *Vetiveria zizanoides*, *Tephrosia vogelii* sont installées. La combinaison des mesures biologique et mécanique permettent d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol d'une part, et de freiner les particules entraînées par le ruissellement d'autre part.

Aussi, la technique de lutte antiérosive biologique consiste à planter des haies vives suivant les courbes de niveau et entre les parcelles de culture. Elle permet les terrassements progressifs de terrains. Les particules retenues par les lignes des haies vives conduisent à une diminution progressive de la pente. C'est une méthode de même principe que la précédente.



Cliché n°06 : Aménagement de terrain en terrasse suivant les courbes de niveaux  
(Auteur)

#### 1.2.4.3. Techniques culturales

Les techniques culturales comme l'association des cultures, la mise en jachère des terrains, l'utilisation d'engrais organique (compost) ou de fumier assurent la stabilité structurale du sol. Elles favorisent la régénération du sol de manière à ce que les éléments le constituant ne soient pas totalement épuisés.

L'agroforesterie est un système de culture qui améliore la capacité d'infiltration du sol et sa meilleure protection contre l'érosion. Il s'agit de garder les couvertures végétales sur le sommet et de planter quelques pieds d'arbres fruitiers et/ou des plantes ligneuses ayant des racines traçantes, en association délibérée avec les cultures annuelles sur les versants. Elle présente ainsi une multifonctionnalité à savoir la production des fruits, la production des bois, l'ombrage pour les cultures et surtout l'amélioration de l'infiltration d'eaux de ruissellement, d'où la protection du sol contre l'érosion.

La SCV est aussi un système de culture permettant d'éviter l'érosion par une protection permanente du sol par de la MO vivante ou morte. Il s'agit d'une culture par semis direct sous des couverts végétaux. Ce système, en cours de vulgarisation à Mandraka, a beaucoup d'intérêt contre l'érosion du fait de zéro labour, de la couverture permanente du sol, et de la relance des activités biologiques, ....

## 2. Caractéristiques biophysiques des sites d'expérimentation

Cette sous-partie présente la variabilité du climat et caractérise les différentes parcelles de mesure, objet de l'étude.

### 2.1. Variabilité du climat

La pluie est un facteur écologique important notamment en zone tropicale. Associée avec la température et la durée d'ensoleillement, elle régit le type et le dynamisme de la végétation, la genèse pédologique ainsi que les faciès d'érosion.

L'érosion due à l'intensité de ruissellement n'est pas seulement fonction de la hauteur de la pluie mais surtout de la durée, la fréquence, l'intensité et la forme de celle-ci (crachin, averse, grêle,...). L'intensité de ruissellement est fonction de l'agressivité de la pluie. D'après ROOSE (1991), une pluie violente apporte une énergie plus grande et favorise le détachement des particules, tandis que les pluies fines ou les crachins ne peuvent que désagréger les mottes de terre.

Les figures ci-dessous montrent le dynamisme et l'évolution de la pluviométrie dans la région de Mandraka.

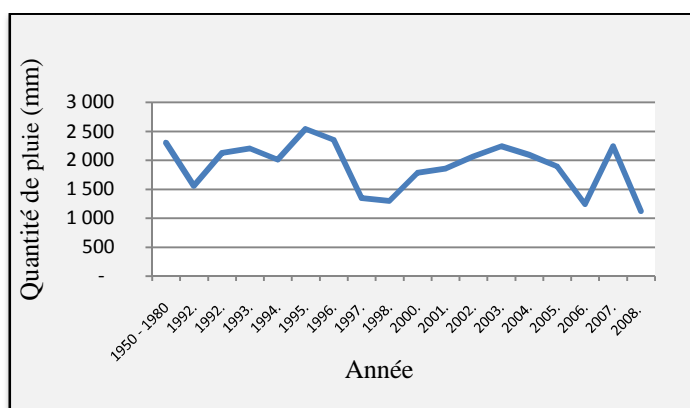


Figure n°11 : Variation de la quantité de pluie de 1992 à 2008

Source : JIRAMA à Mandraka

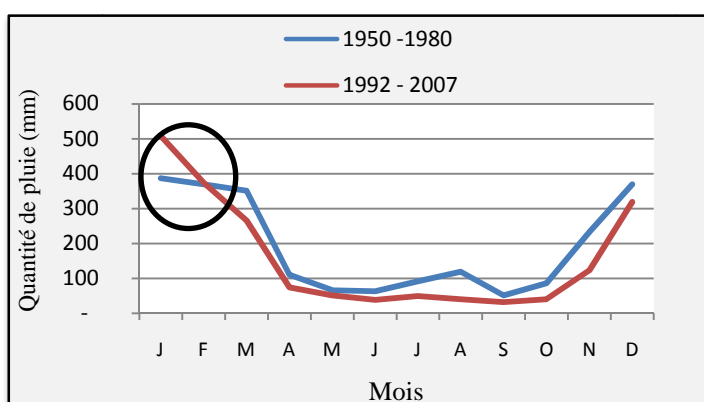


Figure n°12 : Dynamisme de la pluie de 1950 à 1980 et 1992 à 2007

Source : JIRAMA à Mandraka



Le climat de la région de Mandraka est caractérisé par une forte pluviosité à cause de sa situation exposée à l'Alizé. Les quantités de pluie varient d'une année à l'autre (figure n°11). Les moyennes des pluies de 1950 à 1980 et de 1992 à 2007 passent de 2 300mm à 1 964mm. Mais, le test T de Student confirme que cette différence, au seuil de 5%, n'est pas significative (Cf. ANNEXE 8).

Selon la figure n°12, une diminution de la quantité de pluie est constatée sauf les mois de janvier et février. La moyenne de la quantité de pluie durant ces mois de 1992 à 2007 est plus élevée que celle de 1950 à 1980. Les quantités moyennes mensuelles de pluie maximale sont de 531mm vs 387mm en janvier et 379mm vs 370mm en février. Cette répartition inégale de la pluie au cours d'une année et sa concentration sur une courte période peuvent aggraver ainsi le phénomène d'érosion.

## 2.2. Différents modes d'occupation du sol

### 2.2.1. Parcelles aménagées avec des luttes antiérosives

#### a) Parcelle élémentaire n°1

La parcelle PE1 est une parcelle élémentaire aménagée en terrasse de première année. Le terrassement réalisé le mois de décembre 2007 est cultivé de riz pluvial au mois de janvier 2008. Cette parcelle est le témoin de la lutte antiérosive à la fois biologique et mécanique mais il faudra attendre quelque temps pour que le sol de bordure prenne place avant la plantation de *Vetiveria zizanoides* (accord avec paysans).



Cliché n°07 : Parcelle PE1 (Auteur)

Ainsi, la parcelle PE1 ne présente qu'un dispositif de lutte antiérosive seulement mécanique. Même si les vétivers sont installés, leurs racines ne permettent pas de stabiliser immédiatement le sol. Par conséquent, les résultats ne paraîtront pas probablement différents.

#### b) Parcelle élémentaire n°2

La parcelle PE2 est une parcelle élémentaire aménagée en terrasse bordée de haies vives de *Vetiveria zizanoides* depuis 2006. Actuellement, elle entre dans la phase de repos et les espèces végétales qui la colonisent sont constituées d'herbacées et de *Stylosanthes sp*<sup>4</sup>. Ainsi la PE2 représente la parcelle de deux ans d'aménagement avec des luttes antiérosives à la fois biologique et mécanique.



Cliché n°08 : Parcelle PE2 (Auteur)

<sup>4</sup> *Stylosanthes sp.* : une espèce utilisée pour la SCV à Mandraka

c) Parcelle élémentaire n°3

La parcelle PE3 est une parcelle élémentaire aménagée seulement pour des lutttes antiérosives biologiques. Après être mis en jachère de 10 ans, elle est défrichée sans être brûlé et cultivée de pommes de terre ainsi que des lignes de *Vetiveria zizanoides* comme haies vives.

Les restes de friches ne sont pas enlevés mais sont laissés pour jouer un rôle de paille ou « mulch » (protection contre la battance des pluies et fournisseurs des MO au sol).



Cliché n°09 : Parcelle PE3 (Auteur)

Seuls les emplacements de la plantation de pommes de terre au début mars (01 mars) et de *Vetiveria zizanoides* vers mi-mars (12 mars) sont ouverts et sont exposés à la battance de pluie.

2.2.2. Parcelle sous « tavy »

d) Parcelle élémentaire n°4

La parcelle PE4 constitue la parcelle de modèle traditionnel sur laquelle aucune prévention antiérosive n'a été entreprise. Toutefois, pour la matérialisation de l'étude, cette parcelle plantée de manioc il y a 2 ans a été plantée de nouveau par cette même culture pour la simple raison que les maniocs s'adaptent parfaitement aux caractéristiques du sol et à la saison actuelle (mois de mars).



Cliché n°10 : Parcelle PE4(Auteur)

Ainsi, la parcelle PE4 est une parcelle élémentaire sous « tavy » avec une plantation de manioc après 2 ans de jachère.



## 2.2.3. Parcelles témoins

## e) Parcelle élémentaire n°5

La parcelle PE5 est une parcelle élémentaire sous « savoka ». En réalité, c'est une parcelle sous jachère de 5 ans (enquête personnelle 2008) ; les végétaux qui la colonisent n'atteignent pas plus de 1,5m de haut. La parcelle constitue le témoin après la culture. Les espèces végétales rencontrées sont représentés dans le tableau ci-après.



Cliché n°11 : Parcelle PE5(Auteur)

Tableau n°4 : Liste des espèces dominantes dans la parcelle PE 5

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Famille
Harongana	<i>Harungana sp</i>	CLUSIACEAE
Voara	<i>Psiadia altissima</i>	ASTERACEAE
Radriaka	<i>Lantana camara</i>	VERBENACEAE
Ampanga	<i>Cyathea sp.</i>	CYATHEACEAE
Akondro,	<i>Musa sp.</i>	MUSACEAE

## f) Parcelle élémentaire n°6

La parcelle PE6 est une parcelle témoin sous forêt naturelle dont la hauteur des arbres peut atteindre jusqu'à 15m de haut. La parcelle renferme les trois strates qui caractérisent la forêt dense humide.

Les espèces dominantes sont représentées dans le tableau ci après.



Cliché n°12 : Parcelle PE6 (Auteur)

Tableau n°5 : Liste des espèces dominantes dans la parcelle PE 6

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Famille
Tsipatika	<i>Ficus tilifolia</i>	MORACEAE
Lendemy	<i>Anthocleista madagascariensis</i>	POTALIACEAE
Hasina	<i>Dracaena sp.</i>	AGAVACEAE
Ambora	<i>Tambourissa madagascariensis</i>	MONIMIACEAE
Famelona	<i>Gambeya boiviniana</i>	SAPOTACEAE
Sana	<i>Eleocarpus serisseus</i>	ELEOCARPACEAE
Fatora	<i>Mussaenda sp.</i>	RUBIACEAE
Hafotra lalidia	<i>Grewia apelata</i>	TILIACEAE

### 2.3. Caractéristiques des parcelles d'expérimentation

Tableau n°6 : Caractéristiques des parcelles élémentaires

	Parcelle élémentaire n°1	Parcelle élémentaire n°2	Parcelle élémentaire n°3	Parcelle élémentaire n°4	Parcelle élémentaire n°5	Parcelle élémentaire n°6
Type de valorisation	Aménagement en terrasse de 1ère année	Aménagement en terrasse de 2ème année	Aménagement sans terrasse	Mode de culture traditionnelle : « tavy »	Parcelle sous « savoka »	Parcelle sous forêt naturelle
Lutte antiérosive	Mécanique : terrassement de première année	Mécanique (terrassement) et biologique ( <i>Vetiveria zizanoides</i> ) de 2 <sup>ème</sup> année	Biologique : haie vive avec des lignes de <i>Vetiveria zizanoides</i> suivant les courbes de niveau	Pas de lutte antiérosive	Couverture végétale avec des plants moins de 1,50m de long	Couverture végétale avec des arbres plus de 10m de hauteur
Espèce et/ou culture sur la parcelle	Riz pluvial	Jachère <i>Stylosanthes sp</i> et <i>Vetiveria zizanoides</i>	- culture de pomme de terre entre les lignes de vétivers ; - des restes des défriches : <i>Lantana camara</i> , <i>Harungana sp.</i> , ...	Culture de manioc	<i>Lantana camara</i> , <i>Harungana sp.</i> , <i>Psiadia altissima</i> , <i>Cyathea sp.</i> Des fougères et quelques pieds de banane	<i>Anthocleista sp</i> ; <i>Dracaena sp.</i> ; <i>Tambourissa madagascariensis</i> ; <i>Gambeya boiviniana</i> ; <i>Eleocarpus serisseus</i> ; <i>Mussaenda sp.</i> ; <i>Grawia apetala</i>
Roche mère	Migmatite granitoïde	Migmatite granitoïde	Migmatite granitoïde	Migmatite granitoïde	Migmatite granitoïde	Migmatite granitoïde
Unité géomorphologique	Relief de dissection	Relief de dissection	Relief de dissection	Relief de dissection	Relief de dissection	Relief de dissection
Unité topographique	Versant	Versant	Versant	Versant	Versant	Versant
Pente	73%	70%	73%	71%	73%	82%
Surface	1,4m x 8,5m	2,10m x 7,5m	9m x 8m	8m x 6m	10m x 8m	12m x 8m
Exposition	Est	Ouest	Est	Ouest	Est	Ouest
Type de sol	Sol typique à structure polyédrique	Sol typique à tendance rajeunie	Sol typique à structure polyédrique	Sol rajeuni	Sol typique à tendance rajeuni	Sol typique à structure polyédrique

Les détails sur la description typologique des sols et leurs situations géographiques sont joints à l'ANNEXE 5.

### 3. Erosion

Cette sous partie représente et interprète les résultats des pertes en terre et du ruissellement suivant la hauteur de pluie, le mode d'occupation et les caractéristiques du sol ainsi que les relations entre ces deux paramètres.

#### 3.1. Suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie

##### 3.1.1. Pertes en terre suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie

##### 3.1.1.1. Corrélation entre les pertes en terre et la hauteur de pluie

L'influence du mode d'occupation du sol et de la hauteur de pluie sur les entraînements des pertes en terre est montrée dans le tableau ci-dessous.

Tableau n°7 : Corrélation R de Spearman entre les pertes en terre et la pluie

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
R de Spearman	0,54	0,6	0,74	0,4	0,78	0,81
Valeur de P	0,0018	0,0004	< 0,0001	0,0273	< 0,0001	< 0,0001

Seuil  $\alpha=0,05$  ; PE1 : parcelle avec de lutte antiérosive mécanique, PE2 : parcelle avec de lutte antiérosive biomécanique, PE3 : parcelle avec de lutte antiérosive biologique, PE4 : parcelle sous « tavy », PE5 : parcelle sous savoka et PE6 : parcelle sous forêt naturelle.

Chaque parcelle élémentaire a une corrélation significative et positive avec la quantité de pluie mais à degré différent. Le mode d'occupation de sol a une influence sur les pertes en terre grâce à la couverture végétale laquelle permet de dissiper l'énergie des gouttes de pluie. De ce fait, la faiblesse de la corrélation entre les pertes en terre et la hauteur de pluie pour la parcelle PE4 ( $R=0,4$ ) provient du fait que ces sols se saturent en eau très vite et que cette parcelle est la plus sujette à l'érosion et à l'agressivité de la pluie.

Ainsi, plus la valeur de R est basse, moins le sol résiste à la battance de pluie et il sera plus exposé à l'érosion. Des pertes en terre y sont toujours à relever quand la pluie arrive à saturer le sol.

##### 3.1.1.2. Pertes en terre suivant la hauteur de pluie

La répartition des quantités des terres entraînées suivant la hauteur de pluie pour chaque parcelle élémentaire est représentée par les figures suivantes.

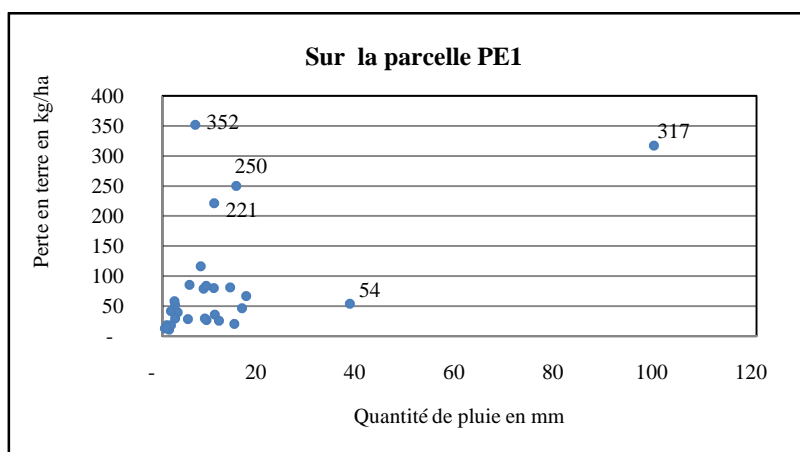


Figure n°13 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE1

La perte en terre maximale de la parcelle PE1 est de 352kg/ha avec une pluviométrie de 6,65mm. Elle est nettement supérieure par rapport à la valeur où la pluie est maximale et ne donne qu'une perte de 317kg/ha. Cette différence est due au fait qu'il s'agit du premier jour de prélèvement et que le talus de cette parcelle est déstabilisé après la mise en place des dispositifs des mesures de pertes en terre et de ruissellement.

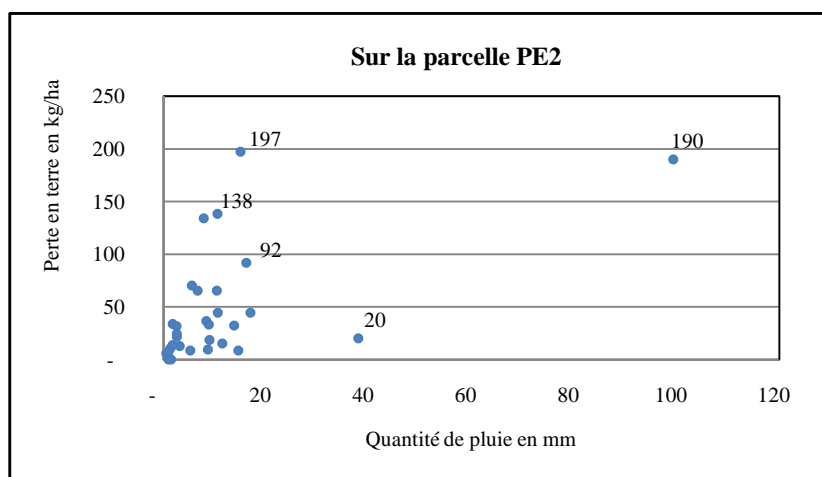


Figure n°14 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE2

La parcelle PE2 présente une certaine évolution de la capacité de rétention en terre par rapport à la parcelle PE1. Cependant, l'existence des pertes maximales en terre (197kg/ha) autres que le jour de pluie maximale s'explique par la présence des éboulements sur le talus.

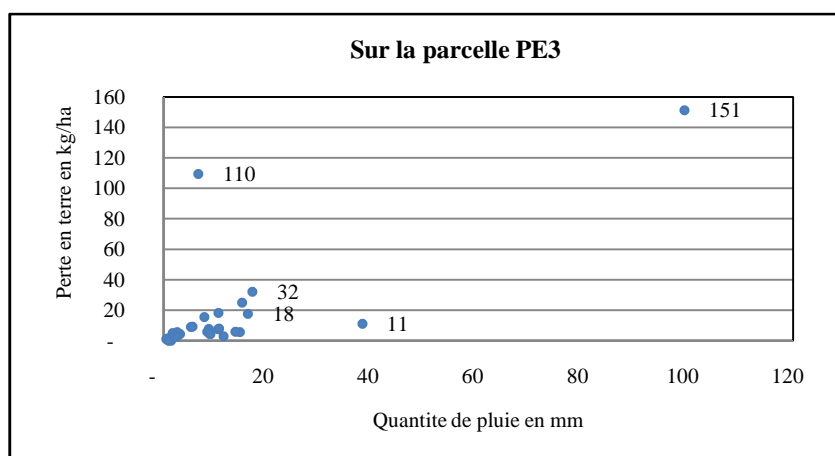


Figure n°15 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE3

Les pertes en terre sur la parcelle PE3 sont de 151kg/ha pour une quantité de 99,3mm de pluie. Elles sont nettement supérieures à celles des parcelles témoins, sous « savoka » et sous forêt, respectivement 4 et 12 fois de pertes enregistrées.

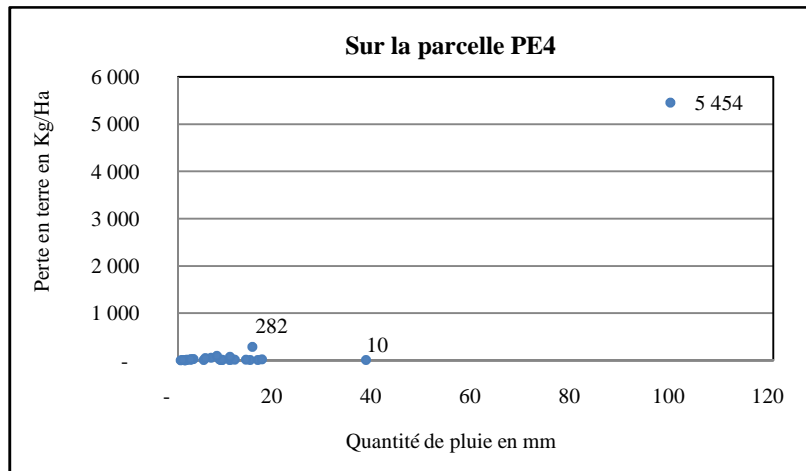


Figure n°16 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE4

Pour cette parcelle élémentaire sous « tavy », les pertes durant laquelle l'intensité de pluie est agressive sont de 139 et 454 fois de celles des parcelles témoins PE5 et PE6. La quantité de terre entraînée atteint 5 454kg/ha avec une pluviosité égale à 99,3mm. L'insuffisance, voire l'absence des couvertures végétales (tiges de manioc seulement), expose le sol à la battance de la pluie et des grêles.

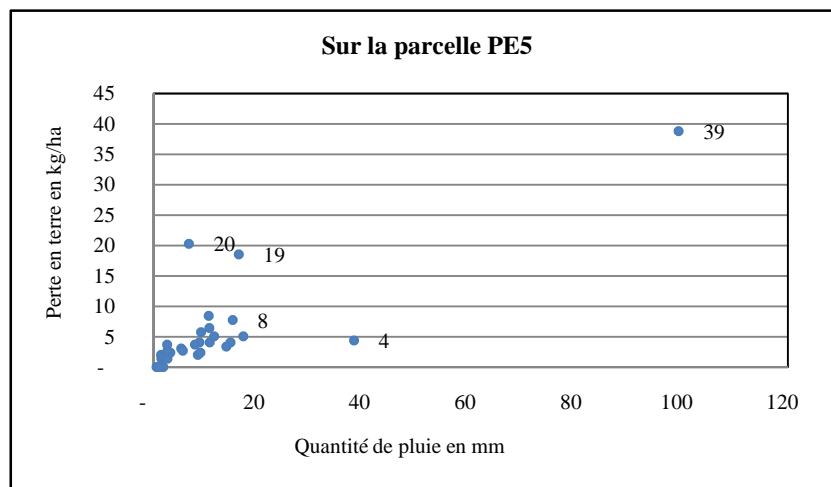


Figure n°17 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE5

Pour la parcelle témoin PE5, les pertes en terre maximales sont de 39kg/ha pour une quantité de pluie maximale. Au cours des prélèvements, les pertes en terre de faibles quantités sont proportionnelles à l'intensité de pluie faible.

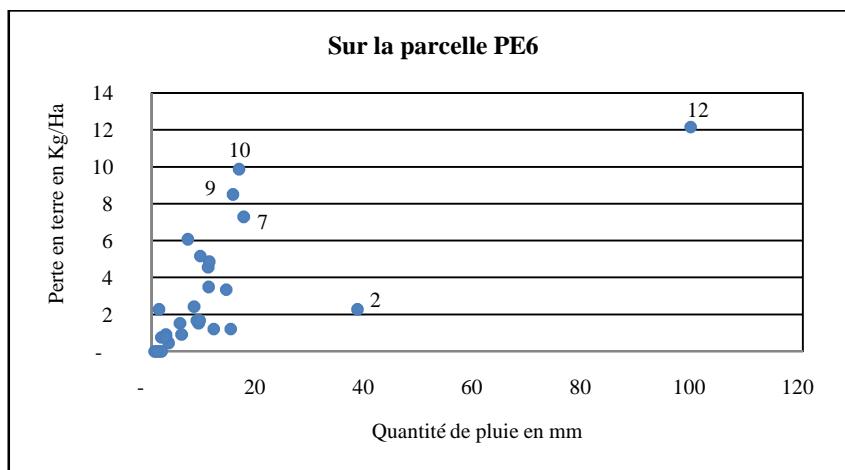


Figure n°18 : Pertes en terre en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE6

Enfin, pour la parcelle témoin sous forêt naturelle, la quantité maximale de la perte en terre n'est que 12kg/ha seulement. Grâce à l'épaisseur de la litière, le sol bien protégé contre la battance de la pluie est à l'abri de l'érosion.

### 3.1.1.3. Pertes en terre cumulées dans les parcelles élémentaires

Les cumuls des pertes en terre durant les jours de la descente sur terrain, figurés ci-après, représentent l'évolution des pertes en terre et la résistance des parcelles en fonction de la quantité de pluie.

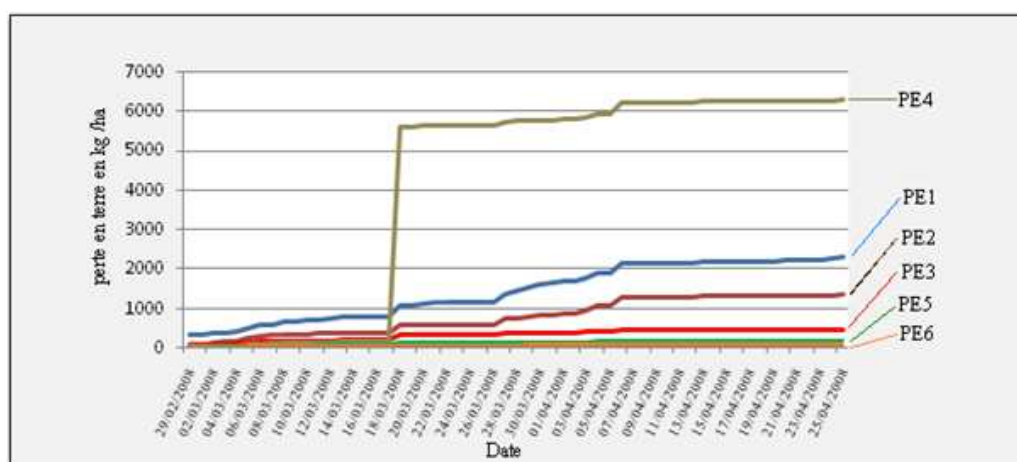


Figure n°19 : Cumul des pertes en terre durant les jours de prélèvement

Les parcelles témoins sont très résistantes à l'érosion. La présence d'une bonne couverture des sols par les végétations et d'une épaisse couche de litières constituées de débris végétatifs (feuilles et branches mortes) rend le sol à l'abri de la battance de la pluie et bloque les particules des terres charriés par le ruissellement. Ce qui n'est pas le cas pour la parcelle sous « tavy » ; l'érosion s'est accéléré lors de la forte pluie. L'énergie des gouttes de pluie attaque directement les mottes pour les disperser et suite à la saturation des sols, les particules déstabilisées sont entrainés facilement par les ruissellements. De plus, le sol, après quelques jours sans pluie (5jours), subit une certaine dessiccation et s'émiette sous l'action directe du soleil. Par la suite, le sol est facilement érodable après sa saturation.

Pour les parcelles aménagées, les parcelles résistent mieux à l'érosion lors d'une forte pluie. En effet, le terrassement atténue l'entraînement des particules ; la couverture de sols par les restes de friches dissipe l'énergie des gouttes de pluie et ses pieds piègent les particules des terres entraînées par les ruissellements.

#### 3.1.1.4. Comparaison des pertes en terre sur les parcelles d'étude

La perte en terre est liée à la hauteur et à l'intensité de la pluie (quantité de pluie dans un intervalle de temps) ainsi que le mode d'occupation du sol. Sur chaque parcelle élémentaire, les valeurs des pertes en terre sont représentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau n°8 : Quantité de perte en terre en t/ha et en mm

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
Perte en terre en mm	0,15	0,08	0,04	0,42	0,008	0,004
Perte en terre (t/ha)	1,28	0,98	0,25	3,90	0,08	0,02
Moyenne (kg/ha)	77	46 <sup>a</sup>	16	180 <sup>a</sup>	5 <sup>b</sup>	3 <sup>b</sup>
Erreur standard	32.41	19.42	11.79	301.74	2.89	1.15

Une même lettre indique l'absence de différence significative entre les parcelles élémentaires au seuil de  $\alpha=0,05$  d'après le test de Mann Whitney

D'une manière générale, la quantité de perte en terre sur la parcelle élémentaire sous « tavy » est plus élevée par rapport aux autres parcelles au mode d'occupation différent. Toutefois, d'après les résultats du test de Mann-Whitney, elle n'a pas de différence significative avec la parcelle élémentaire de deuxième année d'aménagement au seuil de 5%. Les valeurs moyennes différentes de pertes en terre mesurées (46kg/ha pour PE2 et 180kg/ha pour PE4) sont dues à l'écart très élevé des pertes en terre entraînées au moment où la pluie est très agressive (190kg/ha pour la PE2 et 5 454kg/ha pour la PE4). La figure n°19 met en exergue cette différence au jour où la quantité de pluie enregistrée est de 99,3mm et dont 75% sont obtenues en 2h30' suite à un orage suivi de grêle. Par rapport aux parcelles témoins sous « savoka » et sous forêt naturelle, les pertes en terre sur cette parcelle sont respectivement de 12 et 40 fois plus élevées.

Pour les parcelles de culture aménagées en terrasse, la moyenne des pertes en terre sur la parcelle PE1 et celle sur la parcelle PE2 sont significativement différentes. Les pertes en terre diminuent avec le temps de placement de talus avec une différence de 1,47t/ha/an (ou 0,18mm/an). Ce résultat explique qu'au début du terrassement, le sol était généralement instable. Mais au fil du temps, il commence à se stabiliser. Par rapport aux parcelles témoins, la valeur de pertes en terre de la parcelle PE1 est de 15,6 fois plus élevées par rapport à la parcelle sous « savoka » et de 52,7 fois plus élevées par rapport à celle sous forêt. Toutefois, les valeurs de pertes en terre des parcelles PE1 et PE2 sont largement supérieures à celle de la parcelle PE3. Ces différences ne pourraient être dues qu'aux restes de friche couvrant les sols et pour les pièges des particules entraînées dans la parcelle avec l'aménagement biologique.

Pour les parcelles témoins PE5 et PE6, les pertes en terre ne présentent pas de différence significative au seuil de  $\alpha = 5\%$ . Grâce à la présence de couverture végétale, le sol n'est pas exposé directement à la battance de pluie et les particules de terre entraînées par les ruissellements sont retenues par les végétations.

Enfin, pour la parcelle PE3 ; la valeur moyenne de perte en terre, qui est de 16kg/ha, est significativement différente par rapport aux pertes sur les parcelles témoins et sur les parcelles aménagées en terrasse. Cette valeur est relativement faible par rapport à la valeur moyenne des pertes en terre des parcelles PE1 et PE2, mais elle est élevée par rapport à celles des parcelles PE5 et PE6. Cela pourrait dû à la présence plus importante de la couverture végétale sur la parcelle PE3 que celle sur les parcelles PE1 et PE2 et moins importante que celle sur les parcelles témoins.

### 3.1.2. Ruissellement suivant le mode d'occupation du sol et la hauteur de pluie

#### 3.1.2.1. Corrélation entre le ruissellement et la hauteur de pluie

L'infiltration de l'eau dans le sol dépend à la fois de la quantité de pluie et du temps durant lequel la pluie tombe (agressivité de pluie). Le ruissellement ne commence qu'à partir de la saturation de la surface du sol où l'eau n'arrive plus à s'infiltrer. L'interrelation entre la hauteur de pluie et la capacité d'infiltration d'eau dans le sol suivant le mode d'occupation du sol est représentée dans le tableau ci-après.

Tableau n°9 : Corrélation R de Spearman entre le ruissellement et la hauteur de pluie

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
R de Spearman	0,82	0,77	0,78	0,71	0,85	0,80
Valeur de P	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Seuil  $\alpha=0,05$  ; PE1 : parcelle avec de lutte antiérosive mécanique, PE2 : parcelle avec de lutte antiérosive biomécanique, PE3 : parcelle avec de lutte antiérosive biologique, PE4 : parcelle sous tavy, PE5 : parcelle sous savoka et PE6 : parcelle sous forêt naturelle.

Les résultats de test de Spearman illustrés dans le tableau n°9 montrent une forte corrélation positive et significative entre les ruissellements et la hauteur de pluie pour chaque parcelle élémentaire. La quantité de ruissellement est alors en forte liaison avec la quantité de pluie ; et l'infiltration d'eau dans le sol est limitée par la pente très forte après sa saturation.



### 3.1.2.2. Quantité de ruissellement en fonction de la hauteur de pluie

Les figures représentées dans cette partie illustrent la répartition des ruissellements suivant la hauteur de pluie pour chaque parcelle élémentaire.

- Parcelles aménagées

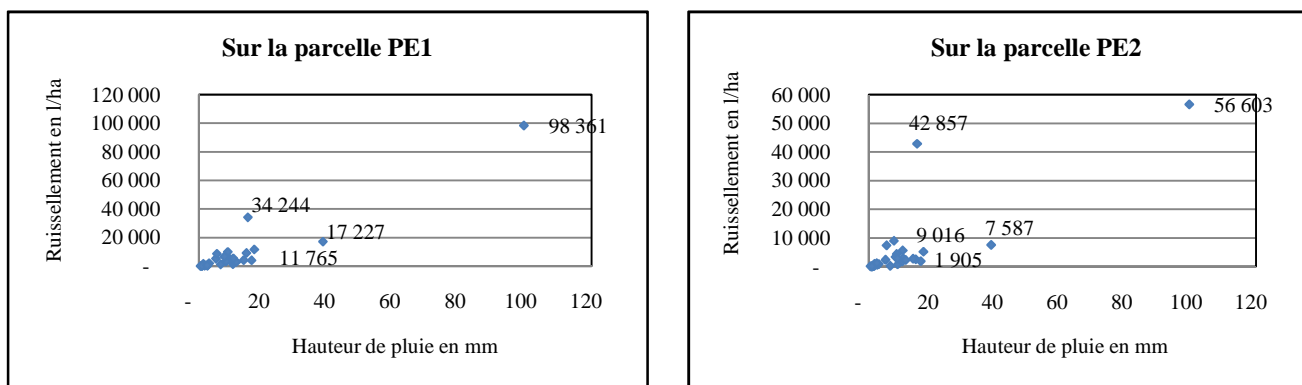


Figure n°20 et n°21 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur les parcelles aménagées en terrasse (PE1 et PE2)

D'une manière générale, une augmentation d'eau de pluie infiltrée est constatée sur la parcelle PE2 par rapport à la parcelle PE1 notamment pendant la pluie maximale. Les quantités d'eaux ruisselées sont de 56 603l/ha vs 98 361l/ha, respectivement pour les parcelles PE2 et PE1. Ces quantités sont liées à la présence des racines plus ou moins développées des autres espèces végétales (arbres fruitiers) et des racines des haies vives constitués par *Vetiveria zizanoides* ; ce qui permet au sol d'augmenter sa capacité d'infiltration d'eau lors de la forte pluie.

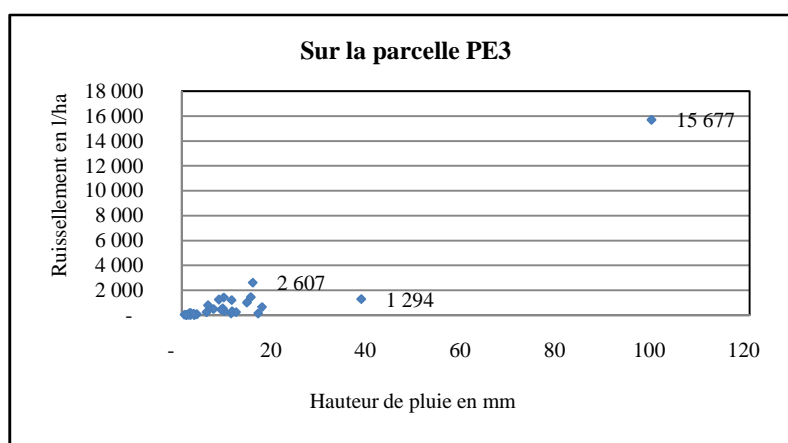


Figure n°22 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle PE3

Pour la PE3, la quantité de ruissellement atteint 15 677l/ha durant la pluie maximale et 10l/ha avec une pluie égale à 0,95mm. Par rapport aux parcelles aménagées en terrasse, les enracinements plus développés des plantes constituées par les restes des friches et la structuration du sol par les MO marquent cette bonne infiltration.

○ Parcelle sous « tavy »

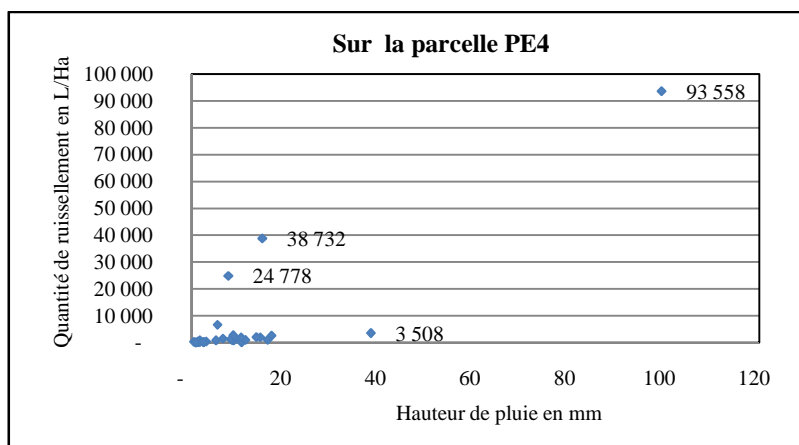


Figure n°23 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur la parcelle sous « tavy »

Pour la parcelle sous « tavy », les quantités de ruissellement varient respectivement de 0 pour les quantités de pluie égale à 0,93mm et 93 558l/ha pour une pluie de 99,3mm. Au total, la quantité de ruissellement collectée est de 18 8419l/ha avec une hauteur de pluie de 366mm.

○ Parcelles témoins

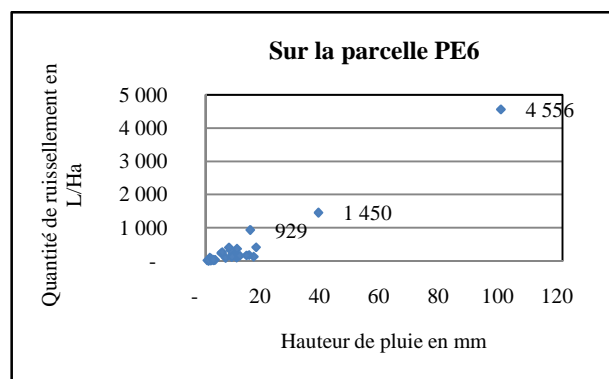
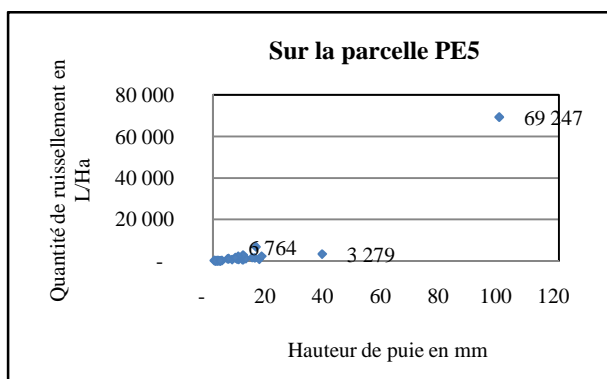


Figure n°24 et n°25 : Ruissellement en fonction de la hauteur de pluie sur les parcelles témoins (PE5 et PE6)

Enfin, pour les deux parcelles témoins, PE5 et PE6, leurs capacités de rétention d'eau sont largement différentes. Ces différences peuvent être dues à la qualité d'enracinement de la végétation pour l'infiltration d'eau et à la différence d'épaisseur des litières pour l'emmagasinement. Pendant la pluie maximale, la quantité de l'eau de ruissellement est de 69 247l/ha pour la parcelle PE5 vs 4 556l/ha pour la parcelle PE6.

### 3.1.2.3. Ruissellements cumulés dans les parcelles élémentaires

Les ruissellements cumulés traduisent l'évolution de l'infiltration de l'eau en cumul sur chaque parcelle durant les jours de prélèvement.

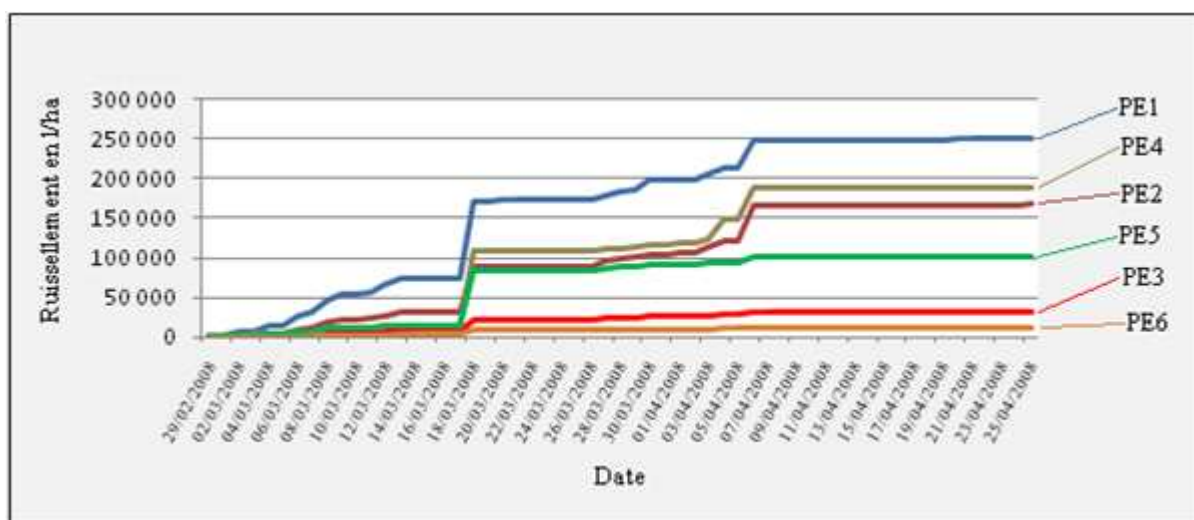


Figure n°26 : Cumul des ruissellements durant les jours de prélèvement

La parcelle PE6, qui est généralement stable, a une bonne capacité d'infiltration d'eau grâce au développement des racines de la végétation naturelle et la bonne structuration du sol. De même pour la parcelle PE3, le développement des systèmes racinaires pendant les 10 années de mise en jachère y améliore l'infiltration d'eau. Par contre, sur les quatre parcelles PE1, PE2, PE4 et PE5, la quantité de pluie maximale influe beaucoup notamment au niveau des parcelles PE1, PE2 et PE4.

### 3.1.2.4. Comparaison des quantités d'eau de ruissellement sur les parcelles d'étude

La quantité de perte en eau est calculée en litre par hectare. Généralement, l'eau de ruissellement dépend de l'infiltration d'eau dans le sol qui est fonction de la perméabilité, de la porosité et de l'enracinement sous-jacent de la végétation. Le tableau ci-après illustre la quantité d'eau de ruissellement sur chaque parcelle d'étude.

Tableau n°10 : Quantité d'eau de ruissellement sur les parcelles élémentaires

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
Ruissellement (l/ha)	251 092	168 603	30 993	188 419	10 886	10 602
% pluie infiltrée	92.5	95	99	94.4	97	99.7
Moyenne (l/ha)	8370 <sup>a</sup>	5620 <sup>ab</sup>	1033 <sup>d</sup>	6281 <sup>be</sup>	3363 <sup>de</sup>	353
Erreur standard	6665	4499	1031	6682	4557	309

Une même lettre indique l'absence de différence significative entre les parcelles élémentaires au seuil de  $\alpha = 0,05$  d'après le test de Mann Whitney.

Pour les différents systèmes étudiés, 92,5% à 99,7% des pluies sont infiltrés. Ces valeurs sont fonction du mode d'occupation de sol des parcelles élémentaires. Les moyennes d'eau de ruissellement varient de 353l/ha à 8 370l/ha.

D'une manière générale, la quantité d'eau non infiltrée sur les parcelles élémentaires va dans le sens du  $PE1 > PE4 \geq PE2 > PE5 \geq PE3 > PE6$ . La plus élevée constatée est celle de la parcelle élémentaire à aménagement de première année et la moins élevée est celle de la parcelle sous forêt naturelle.

Tout d'abord, vérifiée par le test statistique de Mann Whitney, la quantité moyenne de ruissellement 8 370l/ha de la parcelle PE1 ne présente pas de différence significative par rapport à celle de la parcelle PE2 qui est de 5 620l/ha. Aucune amélioration d'infiltration d'eau n'est constatée en deux ans d'aménagement.

Ensuite, la quantité moyenne de ruissellement de la parcelle PE4 n'a pas de différence significative par rapport à celle de la parcelle PE2. Le terrassement permet seulement de limiter la rugosité du ruissellement. Par ailleurs, l'inclinaison trop pentue du terrain ne permet pas l'infiltration d'eau dans le sol.

Puis, en ce qui concerne le cas des parcelles aménagées, le ruissellement sur la parcelle PE3 présente une différence significative par rapport à celui des parcelles aménagées en terrasse. Elle possède une meilleure infiltration d'eau grâce à la présence des racines constituées par les restes de friche et aux couvertures protégeant de sol contre la battance de pluie.

Ensuite, la différence de la moyenne de ruissellement entre les parcelles PE4 et PE5 n'est pas significative. Les racines de la végétation sur la parcelle PE5 qui sont encore moins développées ne favorisent pas l'infiltration d'eau à cause de la pente forte. Entre autres, ce résultat peut être dû à la différence de la quantité de pluie reçue étant donné que la parcelle PE5 est plus exposée à l'alizé et recevrait probablement de pluies plus intenses que la parcelle PE4.

Enfin, la capacité d'infiltration d'eau des parcelles PE3 et PE5 ne présentent pas de différence significative. Cela peut être dû à la ressemblance des caractéristiques du sol (même profil). Le type de végétation et le temps de mise en jachère permettent aussi au sol d'avoir la même propriété pour cette égalité de l'infiltration d'eau.

### 3.1.3. Influence du mode d'occupation de sol sur l'érosion

Cette partie illustre le dynamisme de l'érosion suivant la quantité de ruissellement sur les parcelles d'étude pour les 30 prélèvements. Effectivement, la stabilité structurale du sol, la couverture végétale, les systèmes racinaires et le type des végétaux peuvent être les principales causes de la différenciation des pertes en terre et du ruissellement en fonction de la hauteur de pluie.

### 3.1.3.1. Corrélation entre les pertes en terre et les ruissellements

Les valeurs du test de la corrélation R de Spearman entre la perte en terre et la quantité de ruissellement suivant le mode d'occupation des sols sont représentées dans le tableau suivant.

Tableau n°11 : Corrélation R de Spearman entre pertes en terre et ruissellements

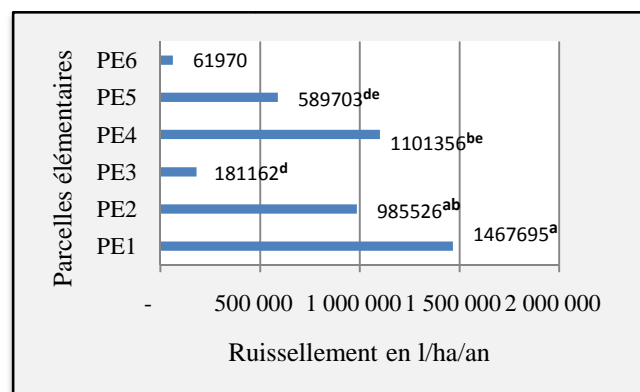
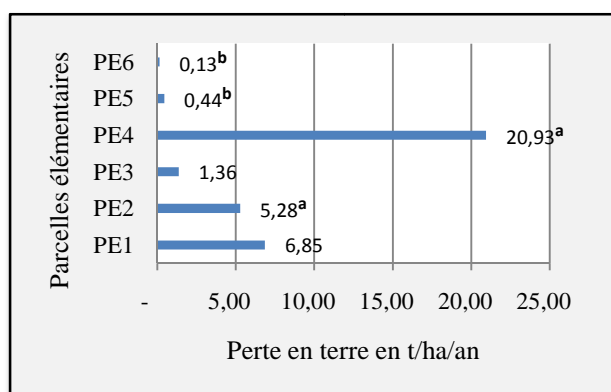
	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
R de Spearman	0,55	0,65	0,72	0,58	0,64	0,69
Valeur de P	0,001789	0,00005	< 0,00001	0.00073	0.00013	< 0,00001

Pour  $\alpha = 5\%$

Les pertes en terre et les ruissellements sont en corrélation positive avec R autour de 0,55 à 0,70. L'entraînement des particules de terre sur chaque parcelle élémentaire provient des eaux ruisselées. La corrélation élevée entre les pertes en terre et le ruissellement se trouve au niveau des parcelles PE3 et PE6. Elle serait due à la densité de la végétation existante dans ces parcelles. Les pieds d'arbre jouent un rôle important dans le blocage des terres charriées par le ruissellement et leurs systèmes racinaires fixent le sol.

### 3.1.3.2. Pertes en terre et ruissellements suivant le mode d'occupation de sol

Les valeurs des pertes en terre et du ruissellement dans une année et sur chaque parcelle d'étude sont montrées par les figures ci-dessous :



Une même lettre indique l'absence de différence significative entre les parcelles élémentaires au seuil  $\alpha = 0,05$  d'après le test de Mann Whitney.

Figure n°27 : Pertes en terre sur les parcelles d'expérimentation (t/ha/an)

Figure n°28 : Ruissellements sur les parcelles d'expérimentation (en l/ha)

D'après les figures n°27 et n°28, les valeurs des pertes en terre ne sont pas proportionnelles aux quantités de ruissellements. Ces différences de comportement sont dues aux différents facteurs qui (i) bloquent l'entraînement des particules (végétation, terrassement, haie vive), (ii) favorisent la capacité du sol à infiltrer l'eau (caractéristique physique : structure, porosité, perméabilité, systèmes racinaires) et (iii) retiennent l'eau (capacité de rétention d'eau par les MO dans chaque parcelle).

A propos des parcelles aménagées en terrasse, les quantités de pertes en terre sont significativement différentes au seuil de  $\alpha = 5\%$ . Une légère diminution des pertes en terre de 1,47t/ha après deux ans d'aménagement a été enregistrée malgré l'égalité significative des quantités d'eau ruisselée. On peut conclure que les terres sur les parcelles aménagées en terrasse connaissent une certaine stabilité en fonction de la durée de leur mise en place.

La parcelle PE3 a la même quantité de ruissellement que la parcelle PE5 mais il y a une différence significative au niveau des pertes en terre entraînée. Cette différence de pertes en terre peut être due aux différences de taux de couverture végétale sur les deux parcelles.

Et en ce qui concerne les deux parcelles élémentaires témoins PE5 et PE6, les quantités de terre entraînées ne présentent pas de différence significative alors que les quantités d'eau ruisselées sont significativement différentes. L'égalité des pertes en terre sur ces deux parcelles est due à la couverture végétale protégeant les sols contre la battance de pluie et à la présence des pieds des espèces végétales qui bloquent les particules entraînées par les ruissellements. A l'inverse, la différence entre la capacité d'infiltration des deux parcelles provient des caractéristiques des sols et des systèmes racinaires des espèces colonisatrices.

### 3.2. Suivant les caractéristiques du sol

#### 3.2.1. Résultats d'analyse du sol

Les analyses effectuées au laboratoire ont concerné surtout les éléments qui aident à définir la stabilité structurale du sol. Le pH, la granulométrie, le carbone, l'azote et l'indice d'instabilité du sol ont été les éléments à identifier. Les données issues de l'analyse ont été utilisées comme référence tant pour la région de Mandraka que pour les parcelles élémentaires afin de pouvoir mieux les décrire.

##### 3.2.1.1. pH

Les pH des deux premières couches des parcelles d'étude sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau n°12 : pH de l'horizon A et de l'horizon B de parcelles élémentaires

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
pH A	5,14	6,07	5,95	6,24	6,26	4,79
pH B	5,79	5,34	5,79	5,16	5,49	4,92

En général, les sols dans la région de Mandraka sont acides. Le pH obtenu de chaque parcelle élémentaire est compris entre 4,79 et 6,26. D'après le classement du pH réalisé par RANDRIAMBOAVONJY (1998), les sols dans la région de Mandraka ont un pH faiblement à très fortement acide. Cela pourrait être dû au lessivage des cations notamment le  $\text{Ca}^{++}$  suite à l'abondance de pluie dans cette région. En outre, la diminution du pH, quand on passe de l'horizon A vers l'horizon B, s'explique par une mauvaise décomposition de la MO en profondeur suite à une faible activité des micro-organismes.

Toutefois, le pH du sol de la parcelle PE6 est le plus acide par rapport aux autres parcelles et présente une légère augmentation quand on passe vers l'horizon sous-jacent. Ces faits ne pourraient être dus qu'à la désaturation élevée de l'horizon A de cette parcelle sous forêt du fait que la bonne infiltration d'eau du sol par ses racines augmente davantage le lessivage des éléments minéraux (cations) vers l'horizon sous-jacent. En outre, dans la parcelle PE1, le pH de l'horizon A est inférieur au celui de B. Cela pourrait être expliqué par le remblai grâce au terrassement.

### 3.2.1.2. Matière organique

- Taux de matières organiques dans le sol

Suivant le mode d'occupation de sol, les taux des MO dans le sol de chaque parcelle élémentaire sont représentés dans la figure ci-après.

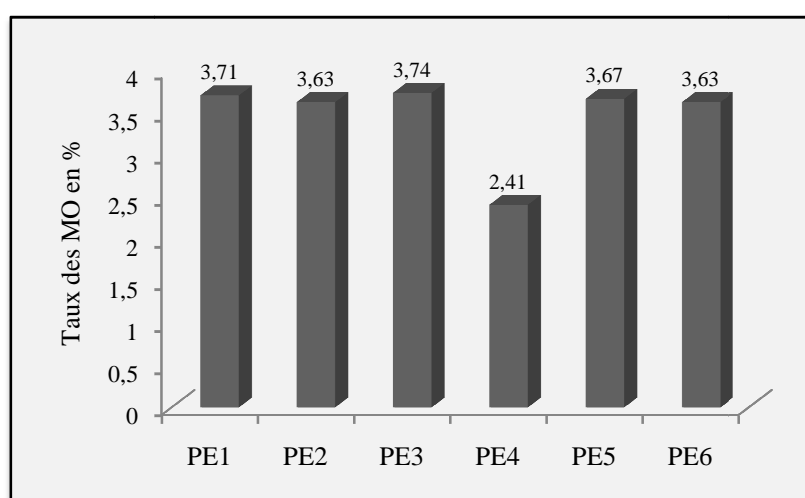


Figure n°29 : Taux de matières organiques dans les parcelles d'étude

Le sol dans la région de Mandraka est organique avec un taux autour de 3,46%. Ces taux sont plus ou moins égaux dans les parcelles d'expérimentation sauf dans la parcelle sous « tavy ». La teneur en MO dans le sol de cette parcelle ne présente que 2,41% vs 3,74% pour la parcelle PE3. Cette teneur élevée en MO dans la parcelle PE3 est fournie par des « mulch » ou des couvertures mortes constituées par les restes des friches après leurs décompositions.

- Perte en matière organique par l'érosion

Le tableau ci-dessous indique les résultats des quantités des matières organiques contenues dans les parcelles élémentaires ainsi que les pertes de ces éléments charriés par l'érosion.

Tableau n°13 : Quantités de matières organiques dans les parcelles élémentaires

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
MO (horizon A) en %	3,71	3,63	3,74	2,41	3,67	3,63
MO (perte en terre) en %	3,71	3,58	3,63	2,41	3,67	3,81
MO (horizon A) en t/ha/an	62,33	49,01	52,36	22,41	53,40	42,83
MO perdue en t/ha/an	0,25	0,19	0,05	0,50	0,02	0,005

Les pertes en MO du sol à Mandraka varient de 0,005 à 0,50t/ha/an pour les différentes parcelles étudiées (Cf. ANNEXE 10 pour les modes de calcul). Ces pertes sont fonction de la quantité de terre charriée par l'érosion.

De ce fait, le mode d'occupation du sol basé sur la pratique de culture traditionnelle ou « tavy » figure comme le mode de valorisation de terrain qui favorise le plus de pertes en MO. Chaque année, 0,5t/ha des MO contenues dans la couche A y est perdue suite à l'entraînement de l'érosion. En outre, ces pertes diminuent de 2 à 3 fois quand le terrain est aménagé en terrasse, 10 à 32 fois quand il est colonisé par des couvertures végétales après culture (jachères) et 124 fois quand il est encore sous forêt naturelle.

### 3.2.1.3. Carbone et azote

Le rapport C/N (carbone sur azote) et les pertes de C et de N entraînées par les pertes en terre sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau n°14 : Valeurs du rapport C/N et quantités de C et N lessivés dans les parcelles d'étude

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
C%	2,04	2,00	2,06	1,33	2,02	2,00
N %	0,28	0,26	0,32	0,14	0,30	0,26
C/N	7,29	7,69	6,44	9,50	6,73	7,69
C lessivé en t/ha/an	0,14	0,10	0,03	0,28	0,01	0,003
N lessivé en t/ha/an	0,19	0,11	0,04	0,29	0,01	0,005

Le rapport C/N dans la région de Mandraka, qui est 7,56 en moyenne, est généralement bas si bien que le rapport C/N normal est entre 10 et 15. De ce fait, si la valeur du rapport C/N est inférieure à 10, cela indique une évolution (décomposition) rapide des MO. En effet, le taux important d'azote constitué dans les MO accentue les activités des micro-organismes (Champignons). Plus la quantité de carbone dans le sol est élevée, plus le nombre des micro-organismes se multiplie afin d'assurer la décomposition (DAMIEN, 1990).

La parcelle PE4 a un taux de C/N le plus élevé par rapport aux autres parcelles élémentaires. Les MO dans cette parcelle sont moins évoluées que celles des autres parcelles. Pour la parcelle PE3, le rapport C/N relativement bas montre que les conditions du milieu dans cette parcelle favorisent une décomposition et une évolution rapide de ses MOF. Ce fait serait la résultante de l'abondance des débris végétaux morts qui ont recouvert le sol.



### 3.2.1.4. Indices d'instabilité et indices d'érodabilité

L'indice d'instabilité « Is » et l'indice d'érodabilité « K » qui donnent une idée sur la stabilité structurale des sols et sur leur résistance face aux problèmes d'érosion sont figurés ci-après.

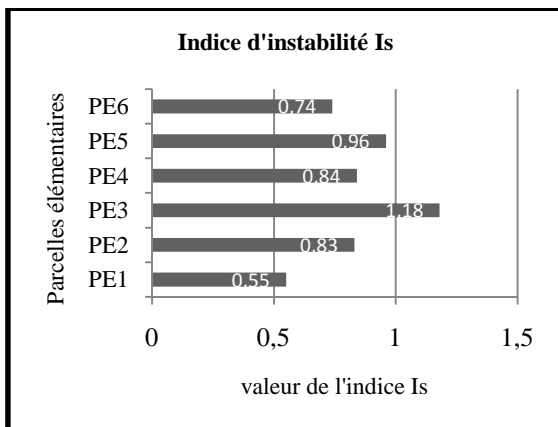


Figure n°30 : Indice d'instabilité Is

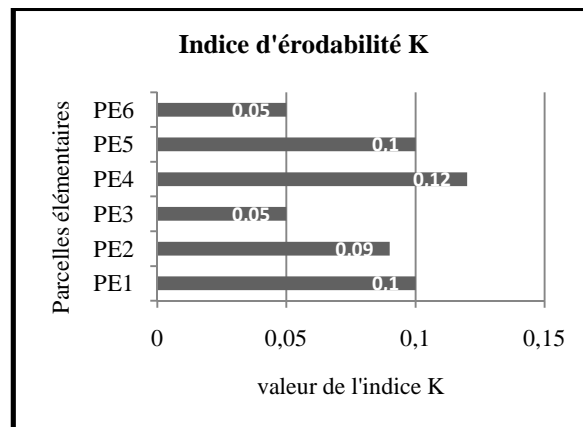


Figure n°31 : Indice d'érodabilité K

Les valeurs de K et d'Is montrent que, dans l'ensemble, les sols dans la région à Mandraka sont généralement stables. Les valeurs de K comprises entre 0,05 à 0,12 indiquent que le sol est faiblement à moyennement érodable. De même, les valeurs d'Is comprise entre 0,55 à 1,18 affirment aussi cette stabilité structurale du sol. Toutefois, en tenant compte de la limite de la détermination de ces deux indices, les valeurs de K seront utilisées pour la comparaison de la résistance du sol à l'érosion sur chacune des parcelles élémentaires.

En effet, la parcelle dont le mode d'occupation recourt à la pratique des cultures traditionnelles présente une valeur de K plus élevée. Ainsi, la parcelle PE4 est celle qui résiste le moins à l'érosion à cause de la quantité faible en MO. Par ailleurs, la parcelle PE5 est moins résistante à l'érosion que la parcelle PE3. Par rapport au profil topographique, la position plus basse de la parcelle PE5 par rapport à la parcelle PE3 lui donne un type de sol plus rajeuni que cette dernière. De plus, le temps de mise en jachère plus large (10 ans) de la parcelle PE3 avant l'aménagement lui confère une bonne porosité, une meilleure stabilité structurale et un développement racinaire de la végétation que la parcelle PE5.

### 3.2.2. Influence des caractéristiques du sol sur l'érosion

Les MO, le rapport C/N et l'indice d'érodabilité K sont les indicateurs retenus dans chaque parcelle élémentaire pour vérifier leurs influences sur les pertes en terre et les ruissellements. Ces indicateurs ont des relations étroites avec la stabilité structurale du sol et ont aussi des effets dans l'atténuation des problèmes causés par l'érosion.

A cet effet, l'humus, représenté par le taux de la MO, joue un rôle de liaison entre les différentes particules minérales du sol. Il peut rendre hydrophobe la surface des particules minérales et a pour effet de ralentir la vitesse d'humectation des agrégats et donc de réduire leur éclatement.

Le rapport C/N, par contre, détermine l'évolution de la décomposition des MO et la formation de l'humus. Enfin, l'indice d'érodabilité K, d'après le nomographe de Wishmeier *et al.* (1971), permet d'évaluer la résistance du sol face à l'érosion (Cf. ANNEXE 3).

Tout comme le mode d'occupation du sol, les caractéristiques du sol influent sur son érodabilité. Le tableau ci-dessous présente la corrélation de ces caractéristiques (MO, C/N et K) avec la quantité de pertes en terre et de ruissellement.

Tableau n°15 : Corrélation R de Spearman entre pertes en terre, ruissellement et caractéristique du sol

Corrélation R de Spearman	C/N	MO	K
Pertes en terre	0,41	-0,23	0,71
Ruissellements	0,23	0	0,62

Le test de Spearman indique la valeur de la corrélation R entre les pertes en terre, les ruissellements et les indicateurs susmentionnés. A cet effet, la valeur de R négative pour la MO signifie que quand le taux de la MO est élevé, les pertes en terre charriée sont minimales. Cette valeur révèle la présence d'une corrélation négative entre le niveau de pertes en terre et le taux de la MO dans le sol. Par contre, les valeurs de R positives pour le C/N et pour le K témoignent la présence des corrélations positives avec les pertes en terre et les ruissellements. Les pertes en terre charriée et les quantités d'eau non infiltrée augmentent quand il y a moins de MO dans le sol et quand son indice d'instabilité est plus grande.

#### **4. Relations entre la pluie, le mode d'occupation, la topographie, les caractéristiques du sol ainsi que les pertes en terre et le ruissellement.**

##### **4.1. Variables explicatives**

Pour le mode d'occupation du sol, les variables choisis pour quantifier l'effet de l'érosion sur les parcelles élémentaires sont la couverture végétale et les systèmes racinaires de la végétation. Pour ce faire, la détermination de la couverture végétale et de l'enracinement de l'espèce suivant le mode d'occupation de sol sont évalués dans l'ANNEXE 8. Ces deux variables amortissent l'effet de l'érosion sur le sol. En effet, les couvertures végétales protègent le sol contre la battance de pluie et leurs enracinements interviennent pour une bonne infiltration au dépens du ruissellement.

Pour la topographie, l'exposition au vent et la pente sont aussi des variables à tenir en compte parce qu'elles présentent des effets sur les problèmes causés par l'érosion. En effet, la pente accentue l'intensité de ruissellement et l'exposition des profils présente des effets sur l'intensité de l'énergie cinétique de la pluie et la quantité de pluie reçue.

Enfin, les mesures faites au laboratoire pour caractériser le sol ont été considérées comme variables. Le rapport C/N, la quantité de la MO du sol, la texture (représentée par la proportion de sable, de limon et d'argile), la densité apparente et le pH du sol sont les indicateurs choisis pour la caractérisation du sol des parcelles d'étude.

En effet, l'abondance de la MO dans le sol en relation avec la valeur de C/N favorise la stabilité structurale du sol. La bonne répartition de la proportion en sable, en limon et en argile dans le sol assure également cette stabilité. En outre, le pH et la densité apparente permettent d'apprécier les activités des micro-organismes dans le sol.

#### 4.2. Corrélation entre les variables

Les figures ci-après illustrant les cercles de corrélation représentent graphiquement l'interrelation entre tous ces variables (mode d'occupation du sol, caractéristique du sol, topographie, érosion et ruissellement).

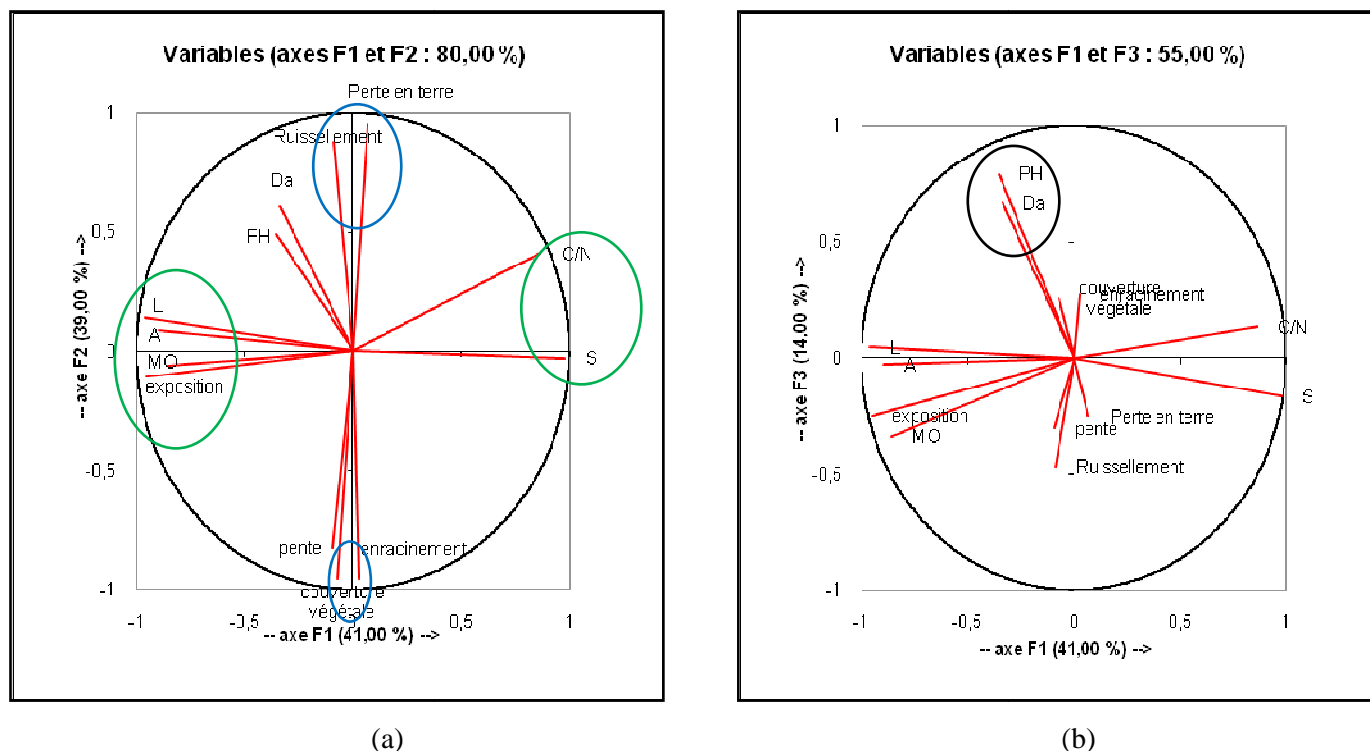


Figure n°32 : Cercle de corrélation entre les variables selon les axes F1 et F2 (a) et F1 et F3 (b) de l'Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (ACP) des caractéristiques des parcelles d'étude permet d'identifier les principaux critères qui influent sur les phénomènes d'érosion.

D'après la figure 32 (a) ; les proportions de sable, de limon, et d'argile sont en corrélation significative avec la quantité des MO, le rapport C/N et l'exposition du profil. Portés par l'axe F1; les limons, les argiles, les MO et l'exposition du profil ont des corrélations positives entre eux mais des corrélations négatives avec le rapport C/N et les sables. Quant à ces deux dernières variables, ils sont corrélés positivement.

De l'autre côté, le mode d'occupation du sol influe sur les phénomènes d'érosion dont l'importance dépend fortement des variables telles que les enracinements et les couvertures végétales. Portés par l'axe F2, les pertes en terre et le ruissellement présentent une corrélation positive. De même l'enracinement et la couverture végétale ont une corrélation significativement positive mais ils ont par contre une corrélation significativement négative avec les pertes en terre et le ruissellement.

En outre, le pH et la densité apparente sont portés par l'axe F3. Ces deux variables ont une corrélation positive et significative. Par contre, la pente est indépendante du fait que les parcelles élémentaires ont des pentes plus ou moins égales.

#### 4.3. Classement des parcelles élémentaires suivant les variables retenues

Les figures ci-dessous représentent la répartition des parcelles élémentaires suivant les variables : mode d'occupation du sol, topographie et caractéristiques du sol.

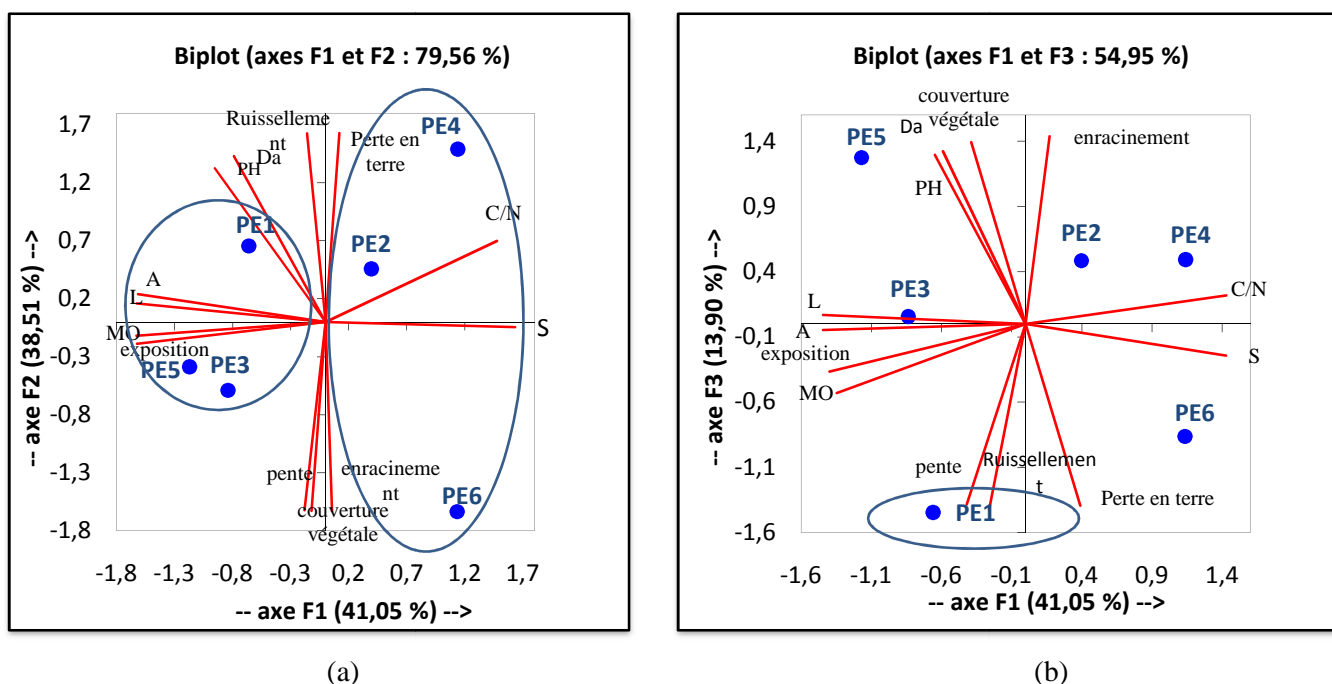


Figure n°33 : Répartition des parcelles élémentaires selon les axes F1 et F2 (a) et F1 et F3 (b) de l'Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales des caractéristiques des parcelles d'étude représente la répartition de chaque parcelle élémentaire suivant les variables qui leur sont rattachées.

Toutes les variables peuvent s'expliquer par les axes F1 et F2 à 79,56%. De même, la parcelle PE1 est plutôt proche de l'axe F3 mais elle peut être expliquée par l'axe F1 car les  $\cos^2$  de l'individu sur l'axe F1 et sur l'axe F3 sont élevés ( $\cos^2 F1 = 0.231$  et  $\cos^2 F3 = 0.376$ ) (figure n°33(b)). D'après la figure n°33(a), les parcelles PE1, PE3 et PE5 peuvent appartenir à un même groupe et sont portées par l'axe F1. De même, les parcelles PE2, PE4 et PE6 sont aussi de même groupe et sont portées par l'axe F2.

Pour les premiers groupes, les trois parcelles élémentaires se situent sur un même profil topographique et sont plus exposées à la pluie (figure n°33(a)). Par rapport à l'influence de l'érosion, les parcelles PE3 et PE5 ont une stabilité structurale meilleure par rapport à la parcelle PE1 grâce à l'abondance de la végétation sur ces parcelles. Comme la parcelle PE1 est aussi portée par F3, la figure n°33(b) montre que cette parcelle est plus sensible à l'érosion. Par contre, les parcelles PE5 et PE3 ne sont pas sensibles en raison de la présence de la couverture végétale pour la PE5 et à la stabilité structurale liée aux MO pour la PE3.

Pour le deuxième groupe, les parcelles PE2, PE4 et PE6 ne sont pas exposées par rapport au vent. Toutefois, par rapport à l'axe F2, les parcelles PE2 et PE4 se trouvent à l'opposé de la parcelle PE6. La figure n°33(a) montre que la parcelle PE6 se trouve du même côté que la couverture végétale et l'enracinement, contrairement aux parcelles PE2 et PE4. De ce fait, ces deux parcelles sont plus sensibles à l'érosion que la parcelle PE6. Pour cette dernière, la présence d'un taux de couverture végétale et d'un bon enracinement lui donne la capacité de retenir le sol. D'après cette même figure, la parcelle PE4 est proche des pertes en terre et du ruissellement du fait qu'elle est la plus exposée à l'érosion. De même pour la parcelle PE2, elle est aussi sensible à l'érosion mais plus résistante par rapport à la parcelle PE4 du fait de l'installation du terrassement et de la présence de la haie vive.

#### 4.4. Synthèse des relations entre la pluie, le relief, le sol, la couverture végétale et l'érosion

Pour pouvoir donner une idée sur les relations entre les différents facteurs retenus dans cette présente étude, il a été jugé nécessaire d'illustrer ces relations selon la figure qui suit.

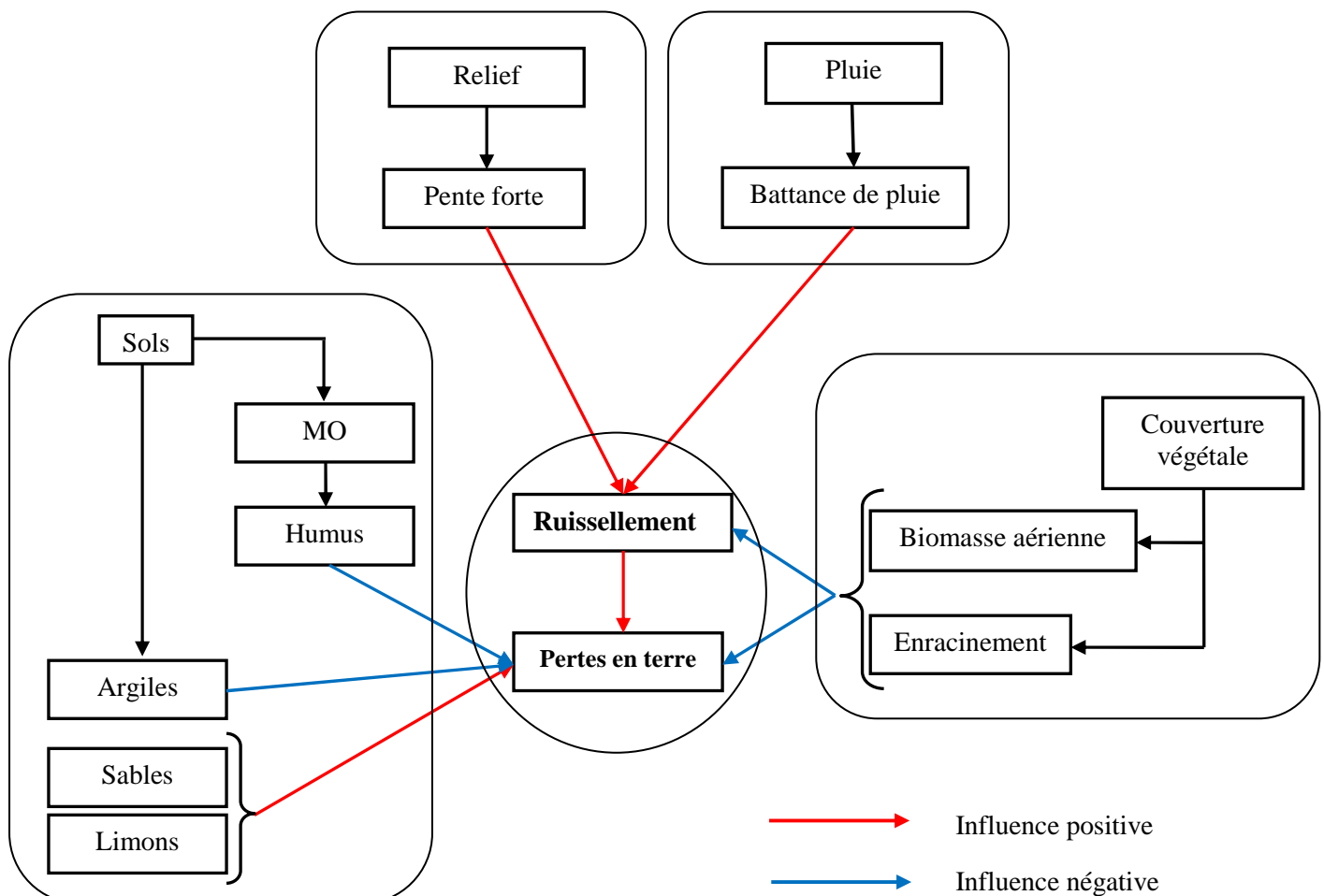


Figure n°34 : Synthèse des relations entre la pluie, le relief, le sol, la couverture végétale et l'érosion

Partie 4

*DISCUSSIONS*  
*ET RECOMMENDATIONS*

*P*

## **DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS**

### **1. Discussions**

Cette dernière partie du présent document est consacrée à la discussion des méthodes utilisées au cours de l'étude pour une meilleure perspective ainsi que des résultats obtenus. Aussi, il paraît nécessaire d'expliquer les variables et les facteurs de différenciation de pertes en terre et de ruissellement dans les parcelles d'étude et de comparer les résultats obtenus avec ceux indiqués dans les ouvrages scientifiques.

#### ***1.1. Méthodologie***

Le choix de l'emplacement des parcelles élémentaires a été conditionné par le mode d'occupation du sol, la pente et la situation sur le mi-versant. De ce fait, les critères de choix de la mise en place des parcelles d'expérimentation paraissent insuffisants en raison de la situation telle que l'absence de mode d'occupation différent des sols sur un même profil topographique et sur une même exposition face au vent. Les différences de l'exposition et de l'éloignement entre certaines parcelles d'étude accroissent l'incertitude des résultats. Par ailleurs, les quantités des pluies qui tombent peuvent être différentes sur les faces d'une colline. La quantité d'eau précipitée sur la face où le vent pluvieux domine est plus importante et apporte plus d'énergie pour la battance.

En outre, le dispositif de mesure de la pluviosité situé à environ 500m des parcelles de mesure devrait être installé près de ces dernières. De plus, ces parcelles de mesure ne devraient pas être éloignées les unes des autres. Ainsi, dans l'approfondissement de cette étude, il est vivement recommandé de mettre un dispositif de mesure de pluie sur les parcelles éloignées afin de ressortir la quantité réelle de pluie pour ces parcelles.

#### ***1.2. Résultats***

##### **1.2.1. Erosion**

Cette étude a prouvée que le sol dans la région de Mandraka est généralement stable. Les valeurs de K et d'Is qui tournent autour de 0,08 et 0,85 le confirment. Par ailleurs, les caractéristiques du sol telles que la structure, la quantité des MO dans le sol sont en constante évolution sous des facteurs externes y compris le climat (DAMIEN, 1990).

Le sol est moins érodable et l'érosion se façonne normalement sur les versants en général. Des pertes en terre entre 0,1 et 1t/ha/an et un ruissellement égal à 1% indiquent la présence d'une érosion normale de sorte qu'il y a un équilibre entre la pédogenèse et la morphogenèse. De même, une valeur des pertes en terre entre 1 et 5t/ha/an représente une faible érodabilité des sols sur les champs cultivés. Par contre, l'érosion est modérée à accélérée quand ces pertes dépassent 10 à 100t/ha/an (ROOSE, 1991 ; VLIET, 2001) (Cf, ANNEXE 9).

De ce fait, à Mandraka, l'érosion est plus accélérée sur les terrains valorisés sous «tavy » sur lesquels les pertes en terre atteignent 20,93t/ha/an. Celle-ci diminue largement lors de l'aménagement du terrain, ce qui vérifie la raison d'existence des projets pour l'aménagement des bassins versants dans la région de Mandraka.

### 1.2.2. Caractéristiques du sol

Le sol dans la région de Mandraka est généralement riche en MO ce qui explique une remarquable stabilité structurale. En effet, par la description du profil topographique (Cf. ANNEXE 5), la couleur sombre de l'horizon A de chaque parcelle marque que les sols sont vraiment organiques. Par ailleurs, les valeurs des quantités des MO issues de l'analyse au laboratoire (2,4 à 3,74% de MO) sont satisfaisantes à élevées selon SOLTNER (1992) (Cf. ANNEXE 11). De plus, la plupart d'entre elles dépasse largement la moyenne (2,5%) selon laquelle la qualification des MO dans le sol par la déduction de la courbe du nomographe de Wishmeier est entre 1 à 5% (Cf. ANNEXE 4).

En outre, face aux caractéristiques du sol de certaines parties de la région de Mandraka où le sol est à dominance sableuse (ex : parcelle PE6), les MO jouent un rôle important dans la stabilité structurale. D'après DAMIEN (1990), les sols où les éléments grossiers (sables et limons) dominant ont tendance à avoir une structure instable, sauf si la teneur en MO est forte. De ce fait, le passage fréquent de feux sur un terrain dégrade irréversiblement le sol à cause de la disparition de ses micro-organismes. Ce qui ne fait que le rendre plus sensible à l'érosion.

### 1.2.3. Evolution de la stabilité du sol sur les parcelles aménagées en terrasse

En deux ans d'aménagement, une certaine évolution de la stabilité du sol sur les parcelles aménagées en terrasse a été constatée (pertes en terre sur PE1=77kg/ha > PE2=46kg/ha). De ce fait, les remblais commencent à prendre une certaine stabilité avec le temps. Les fascines<sup>5</sup> plantées en première année pour la rétention des talus sont actuellement assurées par les racines touffues de l'espèce *Vetiveria zizanoides* utilisée comme haies vives. Cette espèce joue un rôle de blocage des particules entraînées. En outre, l'espèce *Stylosanthes sp.* constitue une couverture pour dissiper l'énergie des gouttes de pluie. Toutefois, l'infiltration d'eau dans le sol n'a pas changé en deux ans d'aménagement. A cet effet, les terres remblayées lors du terrassement ne sont pas encore bien raccordées avec celles de la couche sous-jacente. De plus, les racines des plantes nouvellement installées ne sont pas encore bien développées pour améliorer l'infiltration d'eau en profondeur. Ces faits peuvent être la cause de la ressemblance de la quantité de ruissellement sur les parcelles PE1 et PE2.

---

<sup>5</sup> Fascine : assemblage de branchages utilisés lors des travaux de terrassement afin de retenir les remblais (talus).



#### 1.2.4. Perspectives paysannes sur la valorisation rationnelle des bassins versants

Les paysans commencent maintenant à être conscients de la diminution de la fertilité du sol suite aux mauvaises valorisations des terrains en l'occurrence l'utilisation de feux. Après le passage d'une forte pluie, les couches superficielles des parcelles de culture sont décapées par l'érosion et les éléments fertilisants sont entraînés avec les pertes en terre. Toutefois, l'aménagement en agroforesterie par terrassement est difficile à réaliser pour les paysans sans des appuis et des aides des projets de développement. La réalisation du terrassement demande une certaine quantité de travail. Le temps pour les travaux d'agriculture est limité par les conditions climatiques pluvieuses dans la région. De plus, à cause de l'insécurité et des espèces nuisibles telles que *Rattus rattus*, les paysans n'osent pas prendre des risques pour investir dans ce domaine d'agriculture.

#### 1.3. Vérification des hypothèses

Les résultats obtenus et leurs interprétations permettent de vérifier les deux hypothèses émises.

. L'Hypothèse 1 selon laquelle « *le mode d'occupation et de gestion du sol par une couverture végétale le rend moins sensible à l'érosion* » est confirmée.

Les parcelles où les couvertures végétales sont très importantes présentent une faible quantité de pertes en terre. Ce qui n'est pas le cas pour les parcelles où le sol est exposé à la battance de pluie notamment lors de la pluie agressive. En effet, les systèmes racinaires de la végétation favorisent une bonne infiltration d'eau et les litières approvisionnent en MO pour assurer la stabilité structurale du sol. Les pieds des espèces végétales dans la parcelle constituent aussi des pièges des particules entraînées par le ruissellement. Par ailleurs, les couvertures végétales protègent le sol contre la battance de pluie laquelle est le facteur le plus influent sur l'intensité de l'érosion vu les caractéristiques topographiques du milieu.

. L'hypothèse 2 selon laquelle « *les facteurs favorisant la stabilité structurale du sol atténuent le problème d'érosion* » est confirmée.

Selon les analyses au laboratoire et les observations sur terrain, les sols dans la région de Mandraka contiennent assez d'argile et de MO. A cet effet, le fonctionnement du complexe argilo-humique a pour effet d'accroître la stabilité structurale du sol et donc sa capacité à résister contre la dégradation de sa structure par les pluies ou de le rendre moins sensible à l'érosion (DAMIEN, 1990). Comme les MO évoluent en matières minérales (rapport de C/N bas qui marque l'évolution normale des MOF en matières minérales), les sols dans cette région ne peuvent stocker des MO que pendant une courte durée. Par contre, ces sols ont quand même une stabilité structurale qui serait due à la formation de complexe argilo-humique à partir des MO formées. Toutefois, les résultats d'analyse montrent que la parcelle PE1, à quantité de pertes en terre élevée, a un taux important de MO (par l'apport de compost). Cependant, il faut noter l'existence de petits éboulements des talus étant donné qu'il s'agit de terrasses fraîchement installées.

## 2. Plan d'aménagement simplifié

### 2.1. Contexte

Les reliefs accidentés à pentes très raides accentuent le charriage des particules du sol alors que les précipitations agressives abattent le sol par une pluie élevée annuelle de 1 964mm dont 46% se concentrent en deux mois.

L'exploitation des ressources forestières constitue la principale source de revenu et l'agriculture ne représente qu'une activité secondaire pour la population. Les contraintes au niveau du milieu physique influent ainsi sur les techniques culturales adoptées par la population locale. D'abord, le climat pluvieux réduit le temps disponible pour la réalisation des activités agricoles. Puis, les pentes fortes rendent la région moins adaptée à l'agriculture.

Face à ces constats, les paysans adoptent des techniques culturales faciles à faire et à mettre en œuvre rapidement. Il s'agit de la culture sur brûlis connue sous le nom « tavy » recourant à l'utilisation des feux. Les friches disparaissent facilement et les cendres obtenues fertilisent le sol en éléments minéraux. Pourtant, le feu expose le sol à la battance des pluies, détruit les micro-organismes du sol et réduit considérablement la teneur en MO. L'exposition à la pluie fragilise le sol et la diminution des micro-organismes favorisant la décomposition des MO déstabilise structuralement le sol par la suite, accentuant ainsi le phénomène d'érosion.

### 2.2. Objectifs et stratégies

Pour une utilisation et une valorisation durable des ressources des bassins versants, il faudrait réduire l'érosion hydrique par des activités d'aménagement. Cet objectif général n'est atteint sans la réalisation des deux sous objectifs suivants :

- réduire la sensibilité des sols face à l'érosion ;
- éviter les activités anthropiques favorisant l'érosion.

Les stratégies à adopter pour atteindre ces objectifs sont mentionnées dans le tableau suivant.

Tableau n°16 : Objectifs et stratégies pour l'aménagement

Objectifs	Stratégies
Diminuer la sensibilité du sol face à l'érosion	-Diminuer la pente du terrain -Augmenter la couverture du sol -Augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol -Améliorer la stabilité structurale du sol -Adopter des stratégies de lutte anti-érosive
Eviter des activités anthropiques favorisant l'érosion	-Fournir à la population locale d'autres sources de revenu pour ne pas épuiser les ressources « sol ». -Intensifier les encadrements et les sensibilisations de la population sur l'aménagement des bassins versants.

### 2.3. Activités à entreprendre

Pour diminuer la sensibilité du sol à l'érosion, les activités à entreprendre consistent à occuper le sol de façon à minimiser les risques d'érosion.

#### 2.3.1. Sur le plan technique

##### 2.3.1.1. Au sommet des Tanety

La protection des sommets des tanety est obligatoire car si les parties en amont sont érodées, les masses des particules charriées provoqueront des dégâts en aval. De ce fait, les interventions sur cette zone consistent à bien recouvrir le sol pour le soustraire à la battance de pluie et à l'arrachement des particules.

Pour ce faire, les sommets peuvent recevoir un reboisement avec des espèces ligneuses telles que *Eucalyptus sp.* Ces espèces doivent répondre aux stratégies citées ci-dessus et présenter aussi d'autres fonctions comme la fourniture de bois d'énergie ou de la biomasse. Par ailleurs, elles doivent constituer aussi des espèces mellifères. La vitesse de croissance est un critère de choix de l'espèce. De plus, le développement rapide des ses rejets après les coupes répond à la demande de la population pour le charbonnage lequel constitue une des principales sources de revenu.

##### 2.3.1.2. Sur les versants

Les terrains sur versant sont souvent fortement décapés par l'érosion étant donné que les sols sont ferrallitiques de type rajeuni à fortement rajeuni. La protection et la valorisation de ces versants nécessitent donc différentes interventions.

#### ✓ Agroforesterie

L'agroforesterie comprend tous les systèmes d'utilisation des terres dans lesquels des plantes ligneuses pérennes sont cultivées sur des parcelles également exploitées pour des productions agricoles ou animales, qu'il s'agit d'une association spatiale ou temporelle ; le but est d'atteindre une production accrue et une stabilité écologique et socio-économique dans les exploitations agricoles. Pour le cas de la Mandraka, il faut se préoccuper de la fixation du sol sur les versants (espèces ligneuses) et de le protéger contre la battance de pluie (couverture) en même temps que d'en augmenter la productivité.

Les interventions à entreprendre sont :

- *Culture en terrasse* : il s'agit de remodeler les versants en terrains de culture disposés en escalier. En effet, le terrassement peut recourir d'une part à un procédé biomécanique qui permet d'aménager directement les terrains en terrasse. Les terrasses ainsi construites sont soutenues par des fascines et ses bordures en aval sont stabilisées par des haies vives. Et d'autre part, le terrassement peut recourir à un procédé seulement biologique pour permettre une terrasse progressive. Ce dernier recours consiste à implanter des bandes de haies vives, suivant les courbes de niveau, de faible largeur.

La terrasse ainsi que les bandes de végétation constituant les haies vives freinent le ruissellement et provoquent le dépôt des terres transportées. De ce fait, ces techniques permettent à la fois d'améliorer la fertilité des parcelles traitées par l'accumulation des terres fines et des MO et de réduire le phénomène d'érosion par l'augmentation de l'infiltration d'eau dans le sol.

Du point de vue économique, la pratique de la lutte antiérosive seulement biologique paraît intéressante. Elle réduit considérablement les coûts de constructions et d'entretien. Les espèces adaptées sont *Vetiveria zizanoides*, *Tephrosia vogelii*, ...

- *Culture en couloir* : il s'agit d'une installation en bande alternée d'une culture pérenne et d'une culture saisonnière. La culture pérenne, constituée d'arbres ou d'arbustes, fournit des engrais organiques permettant d'approvisionner en permanence de la MO. De plus, ces cultures pérennes permettent de diminuer aussi la surface exposée à la pluie. Ce qui la soustrait à la battance de la pluie. En outre, les racines de ces cultures retiennent le sol pour ne pas être entraîné par l'érosion.

- *Répartition régulière mixte des composantes ligneuses et des cultures* : il s'agit d'une plantation d'arbres fruitiers ou d'arbres fournisseurs de MO disposés de façon aléatoire dans les champs de culture. Ces plantes ainsi installées jouent un rôle multiple tant pour le sol que pour les paysans telles que (i) sources de revenu par les produits fruitiers, (ii) source d'énergie calorifique et protection du sol contre la battance de pluie (iii) meilleure infiltration de l'eau de ruissellement et fixation du sol par les systèmes racinaires.

Les espèces qui s'adaptent bien dans cette région sont les orangers, les bibassiers, les litchis, les manguiers, etc.

#### ✓ **Culture sous couvert végétal**

Elle consiste à installer des végétations qui permettent de bien couvrir le sol. Ces couvertures servent à protéger la surface du sol contre l'érosion grâce à leurs biomasses mortes (mulch) ou vivantes. En effet elles permettent de dissiper l'énergie des gouttes de pluie et de ralentir l'écoulement des lames d'eau en surface tout en augmentant l'infiltration.

Néanmoins, il faut bien gérer les biomasses car il est évident qu'une plante vivante vit en compétition avec la culture principale et un « mulch » étouffant risque d'induire le phénomène de la « faim d'azote » (RASAMILALA, 2004).

#### ✓ **Jachère améliorée**

Il s'agit de la mise en place des plantes améliorantes fixatrices d'azote atmosphérique, généralement des légumineuses, au lieu de laisser les friches s'installer sur le sol durant la jachère. Ces plantes améliorent la fertilité du sol et réduisent ainsi la durée de rotation de la jachère.

La pratique de la jachère améliorée est donc indispensable pour la population locale d'autant plus que les terrains adaptés à l'agriculture sont insuffisants dans la région. Aussi, la vulgarisation de l'utilisation de la jachère améliorée permet-elle de réduire la conquête de terres forestières en terres agricoles.

#### *2.3.1.3. Sur les bas de pente*

Les parties en aval sont les plus victimes de l'érosion. De ce fait, les interventions qui visent à organiser le drainage des excédants d'eau durant la saison de forte pluie sont nécessaires pour protéger les cultures maraîchères et les étangs localisés sur les bas de pente. Il s'agit de canaliser les excès d'eau, de les intercepter par des fossés collecteurs et de les évacuer à l'aide d'un canal de dimensions adéquates. Il faut aussi prévoir des ceintures de bas-fond avec des haies filtrantes ou des bandes d'arrêt enherbées qui absorbent partiellement le ruissellement et piègent les sédiments provenant en amont.

### *2.3.2. Sur le plan socio-économique*

#### *2.3.2.1. Développement d'autres activités*

Le développement des activités autre que l'agriculture telles que l'arboriculture et l'apiculture aide la population à ne pas abuser de l'exploitation du sol. De plus, leur mise en œuvre ne demande pas beaucoup de temps. Plus de trois quart de la population à Mandraka pratiquent l'apiculture. Elles ont acquis des connaissances sur cet élevage mais ne la considèrent pas encore comme une activité professionnelle. Il en est de même pour l'arboriculture. De nombreux produits fruitiers proviennent de cette région. Pourtant, les problèmes majeurs résident dans l'insuffisance d'infrastructures d'évacuation des produits. La commercialisation des produits agroforestiers est un des facteurs qui conditionnent le plus le maintien des pratiques agroforestières (FALCONER et ARNOLD, 1996 cités par RAMAMONJISOA, 2008). Ainsi, la commercialisation de ces produits reste la majeure préoccupation des paysans.

Cependant, un encadrement et un apport des semences améliorées (ou plants améliorés) favorisent l'amélioration de la qualité de la production qui permet d'attirer les commerçants et d'assurer un meilleur écoulement des produits.

#### *2.3.2.2. Sensibilisation et formation*

Les différentes interventions sus-mentionnées ne peuvent être réalisées sans la sensibilisation et la formation de la population cible. Toutefois, la sensibilisation ne suffit pas pour atteindre le but assigné, elle doit être accompagnée d'une formation et d'une éducation qui exigent, avant la formation technique des paysans et la vulgarisation des techniques améliorées, un essai de démonstration.

L'éducation et la sensibilisation de la population sur les effets néfastes de l'utilisation de feux de végétation, qui est un des facteurs provoquant inexorablement la dénudation et l'instabilité structurale du sol, s'imposent.

## 2.4. Cadre logique

Objectif général : réduire l'effet de l'érosion hydrique dans la région de Mandraka

Tableau n°17 : Cadre logique pour l'aménagement

Objectifs	Résultats attendus	Activités	IOV	Acteurs	Echéance
Diminuer la sensibilité du sol à l'érosion	. Le sol est protégé contre la battance de pluie	. Adopter le mode de culture sous couvert végétale (SCV)  . Adopter des cultures en couloir	. Surface recouverte par <i>Stylosanthes sp.</i>  . Surface avec cultures en couloir	. Paysans agriculteurs et Département des Eaux et Forêts	LT
	. Le sol est bien retenu et sa capacité d'infiltration est augmentée	. Reboiser les zones critiques notamment les parties en amont . Planter en association des arbres fruitiers ou des plantes ornementales ligneuses	. Surfaces reboisées  . Surfaces plantés d'arbres fruitiers	. Paysans  . Paysans agriculteurs avec des aides du Département des Eaux et Forêts	MT
	. L'intensité du ruissellement est diminuée	. Transformer les terrains vulnérables en terrasses par des méthodes biomécaniques ou seulement biologiques par plantation des haies vives	. Surfaces aménagées	. Département des eaux et forêts (ESAPP), Paysans agriculteurs	MT
	. La stabilité structurale des sols est améliorée	. Apporter des amendements organiques au sol  . Promouvoir l'utilisation de la jachère améliorée	. Quantités de compost et de fumiers apportés  . Surface occupée par la jachère améliorée	. Paysans agriculteurs  . Paysans agriculteurs, Département des Eaux et Forêts	LT

CT : Court Terme <2ans ; MT : Moyen terme 2 à 5 ans ; LT : Long terme >5ans

Objectifs	Résultats attendus	Activités	IOV	Acteurs	Echéance
Eviter les activités anthropiques favorisant l'érosion	. Les autres activités telles que l'arboriculture et l'apiculture sont développées	. Améliorer la commercialisation des produits par l'établissement des relations stables entre les producteurs et les collecteurs  . Proposer la création de place de marché aux bords de la RN2 en concertation avec les paysans et les autorités du Fokontany	. Nombre des contrats  . Nombre des stades	. Paysans, Fokontany Mandraka, Commerçants	LT
	. Les techniques culturales avec des lutttes antiérosives sont adoptées	. Sensibiliser, éduquer et former les paysans sur les modes et les techniques de culture améliorées	. Nombre de paysans formés ainsi que  . Nombre de formations et de réunions réalisées	. Départements des Eaux et Forêts, paysans	CT à MT

*CT : Court Terme <2ans ; MT : Moyen terme 2 à 5 ans ; LT : Long terme >5ans*

\*\*\* § \*\*\*

## *CONCLUSION*

*P*



## CONCLUSION

La présente étude a permis d'approfondir les relations entre le mode d'occupation du sol, les précipitations, les caractéristiques du sol, et l'érosion dans la région de Mandraka ainsi que les facteurs les plus influents sur les problèmes d'érosion et tout ceci dans le souci de concevoir un plan d'aménagement simplifié.

Au niveau des six parcelles représentatives de la région de Mandraka, les sols sont généralement stables. Cette stabilité est indiquée par les valeurs d'Is et de K qui sont respectivement de 0,85 et 0,08 en moyenne. Les résultats ont montré une évolution, au cours du temps, de la résistance de la surface aménagée en terrasse face à l'érosion. Par ailleurs, les fascines mises en première année ont été totalement remplacées par les racines touffues des haies vives en deuxième année. En outre, malgré la stabilité structurale du sol dans la parcelle sous « tavy », elle est toujours sujette à l'érosion du fait de son exposition à la battance de pluie. La SCV mérite en effet d'être suivie vue de sa capacité de protéger le sol vis-à-vis de l'érosion.

Le mode d'occupation du sol par la couverture végétale et les facteurs permettant sa stabilité structurale tels que les argiles et les MO favorisent la protection et la résistance du sol au problème d'érosion. Ainsi, c'est le mode d'occupation du sol qui est le plus influant parmi les facteurs considérés face au problème d'érosion. Vu la topographie très pentue et l'abondance de pluie dans la région, l'influence des caractéristiques du sol sur les pertes en terre et le ruissellement n'est pas déterminant au seuil de confiance de 95 %.

De l'autre côté, l'étude a également montré que le plan d'aménagement simplifié proposé pour cette région devrait tenir compte des activités suivantes pour permettre une réduction de l'intensité de l'érosion : (i) le maintien de la couverture végétale pour protéger le sol contre la battance de pluie, (ii) la réduction de la pente par des terrassements, (iii) l'atténuation des activités pouvant nuire au développement de la faune du sol (ex : feux de végétation).

Bref, cette étude a permis d'appréhender les phénomènes d'érosion et leur relation avec les caractéristiques internes et externes agissant sur le milieu. Elle peut servir de base pour l'aménagement à entreprendre dans la région. Toutefois, il est à souligner que certains paramètres tels que l'exposition, l'influence d'autres facteurs d'érosion comme le Ca et le fer, devraient être pris en compte dans les recherches à venir.

\*\*\* § \*\*\*

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **Publications scientifiques**

1. ANDRIAMBOAVONJY F.- 2001.- Contribution à l'étude des méthodes traditionnelles d'utilisations des sols dans la région de la Mandraka.- Mémoire de fin d'études de l'ESSA.- Département Eaux et Forêts, 98p.
2. ANONYME.- 1996.- Inventaire écologique forestier National -Recueil botanique de 200 espèces forestières.- 483p.
3. BATTI A. et DEPRAETERE C.- 2007.- Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion.- IRD, 24p.
4. BOLI Z., BEP B. et ROOSE E.- 1994.- Impact de l'érosion sur la productivité végétale sur sols sableux en zone soudanienne du nord Cameroun. In support de cours DEA. ESSA-Forêts.
5. BOURGEAT F.- 1972.- Sols sur socle ancien à Madagascar : type de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire.- Paris.- ORSTOM n°57, 335p.
6. BOYE A. et ALBRECHT A.- 2004.- Soil erodibility control and soil carbon losses under short term tree fallows in Western Kenya.- In: support cours DEA à l'ESSA-Forêts, p 123 – 143.
7. CTFT.- 1989. - Mémento du forestier. Techniques rurales en Afrique.- 3<sup>e</sup> Edition.- CTFT.- 1079p.
8. DAMIEN M.- 1990.- Manuel d'agronomie tropicale appliquée à l'agriculture Haïtienne.- Faculté d'agronomie et de médecine Vétérinaire d'Haïti.- Paris.- 410p.
9. DOUNIAS L. et JOUVE P.- 2002.- Les systèmes de culture à base de culture végétale et semi direct en zone tropicales.- CIRAD/CA.
10. HENIN S, ROBICHET O, JONGERIUS A.- 1955.- Principe pour l'évaluation de la stabilité de la structure du sol.- ORSTOM, p 537 – 557.
11. KÖNIG D.-1994.- Conservation et amélioration de la productivité des sols dans des systèmes agroforestiers au Rwanda.- Département Géographie, Université de Coblence.- In support cours DEA à l'ESSA-Forêts, p 41 – 48.
12. LEEMANN E.- 1989.- Etude de l'évolution des défrichements dans la région de Mandraka 1967-1987.- Akon'ny Ala N°2.- ESSA-Forêts, p15-22.
13. LOTEZ J. et MARTHIEU C.- 1990.- Dictionnaire de la science du sol.- Lavoisier Tec et Doc.- Paris, 384p.

14. LOUPPE D. ET OLIVIER R.- 1996.- Impact des feux annuels sur la végétation et les sols des savanes du centre de la côte d'Ivoire.- CIRAD-forêts.- France.- In : support cours DEA à l'ESSA-Forêts, p 80-95.
15. MARTIN Cl. 1996.- Erosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après l'incendie de forêt dans le massif de Maures.- Etude et gestion des sols Vol I, p 179-192.
16. RABENASOLO S.- 1997.- Analyse du système de revenu des paysages en vue de la mise en place d'une gestion communautaire des ressources naturelles dans la région de Mandraka.- Mémoire de fin d'études de l'ESSA.- Département Eaux et Forêts, 90p.
17. RABEZANDRINY R.- 2007.- Pédologie appliquée : tanety et culture d'exportation.- Département Agriculture – ESSA, 96p.
18. RAJAONARISOA L.- 2002.- Contribution à la constitution d'une base de données par l'étude de l'évolution de l'occupation des sols entre 1949 et 1996 ; cas de la Mandraka.- 105p.
29. RAJOELINA J.- 2007.- Analyses de l'influence des types de sol sur la couverture végétale de la forêt de Kirindy-Morondava.- Mémoire de fin d'études de l'ESSA- Département Eaux et Forêts, 67p.
20. RAJOELISON L., RANDRIAMBOAVONJY J., RAZAFINDRAMANGA M., RABENILALANA F. et RAKOTO RATSIMBA H.- 2007.- Aménagement participatif d'un bassin versant à Mandraka, ESAPP-ESSA Forêts, 41p.
21. RAMAMONJISOA N.- 2008.- Étude de l'importance socioéconomique des Produits Forestiers Non Ligneux et des produits agroforestiers en vue de l'amélioration des revenus de la population locale ; cas de la zone Mandraka, Région Analamanga.- Mémoire de fin d'études de l'ESSA- Département Eaux et Forêts, 75p.
22. RANDRIAMBOAVONJY J.- 1996.- Les principaux pédopaysages à Madagascar : Etude des pédopaysages dans quatre zone-test de Madagascar (côte Est, Hautes Terres centrales, Moyen-Ouest et côte Ouest).- Série n°03.-ESSA-Forêts, 93p.
23. RANDRIAMBOAVONJY J. 1998.- Les analyses courantes du sol.- manuel forestier n°08.- ESSA-Forêts, 39p. + Annexes.
24. RANDRIAMBOAVONJY J.- 1997.- Examen du profil pédologique.- manuel forestier n°02.- ESSA-Forêts, 27p.
25. RASAMILALA A.- 2004.- Contribution à la résolution des problèmes de dégradation du sol par l'érosion hydrique pour la mise en valeur des Tanety : cas des SCV sur le riz pluvial dans la région du Vakinankaratra.- Mémoire de fin d'études de l'ESSA.- Département Agriculture, 111p.

26. RAZAFINDRAMANANA N.- 2006.- Afforestation et stockage de carbone en lisière ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar).- Mémoire DEA option Eaux et Forêts.- ESSA, 73p.
27. ROOSE E.- 1991.- Introduction à la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité du sol.- GCES - ORSTOM/CNEARC, 225p.
28. ROOSE, E.- 1984.- Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical - Conséquences sur les méthodes antiérosives.- Machinisme agricole.- Tropical 87, p4-18.
29. SOLTNER D.- 1992.- Les bases de la production végétale.- Tome 1 : le sol, 467p.
30. VLIET L.- 2001.- Supplément technique sur les indicateurs agroenvironnementaux ; Érosion hydrique : Méthodologie.-12p.
31. YORO G. et GODO G.- 1990.- Les méthodes de mesure de la densité apparente : analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné.- ORSTOM vol. XXV, 17p.

### **Sites Internet**

1. [www.botany.uwc](http://www.botany.uwc)
2. [www.cirad.mg](http://www.cirad.mg)
3. [www.ecosociosystemes.fr](http://www.ecosociosystemes.fr)
4. [www.eusoils.jrc](http://www.eusoils.jrc)
5. [www.fao.org](http://www.fao.org)
6. [www.lepotagerfacile.free.fr](http://www.lepotagerfacile.free.fr)
7. [www.omafra.gov](http://www.omafra.gov)
8. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## *ANNEXES*

*P*

## ANNEXES

## ANNEXE I : Données climatiques de la région de Mandraka

Donnée de la température de 1950 à 1980

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T max	25,5	25,3	24,6	23,7	21,8	19,4	18,6	19,7	21,8	24,8	25,7	25,9
T min	14,8	15,4	14,5	13,4	10,9	8,7	8,4	8,1	9,4	11,3	12,8	14,5
Tmoyenne	20,1	20,3	19,6	18,5	16,4	14	13,5	13,9	15,6	18,1	19,2	20,2

*Source : Service de la météorologie Ampandrianomby*

Donnée de la précipitation de 1950 à 1980

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
P	386,88	369,6	361	111	66,8	64	91,7	119,9	51,8	86,7	232,8	369,3
Nb.jrs	9	17	19	11	9	10	12	12	8	8	14	18
Max de24H	142,7	140,6	276,2	95,7	48,3	37,3	60,6	50,4	60,9	54,1	105,7	123,7

*Source : Service de la météorologie Ampandrianomby*

Donnée de la précipitation de 1992 à 2008

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
1992	418,4	262,5	349,3	170,8	60,7	13	14	12	14	5	6	13
1993	303,0	512,0	306,4	130,5	88,5	10	16	21	12	9	10	11
1994	776,0	426,6	304,5	73,3	62,0	20	18	21	14	9	15	5
1995	712,6	358,8	161,8	112,7	73,3	22	7	13	15	9	4	7
1996	928,0	369,8	430,1	32,5	24,4	14	3	15	9	3	1	2
1997	645,1	413,6	252,0	94,5	41,6	15	19	13	10	9	18	18
1998	376,2	385,7	155,0	75,2	48,8	10	11	14	22	15	6	5
1999	x	x	x	x	x	x	x	22	12	11	12	14
2000	135,1	526,8	387,9	20,3	24,4	7	17	22	12	7	6	17
2001	696,1	381,2	172,0	46,7	56,8	15	17	9	13	3	10	3
2002	267,0	485,5	183,8	89,1	94,9	19	17	11	20	10	10	13
2003	681,7	285,7	436,1	23,6	45,4	9	14	11	8	14	4	16
2004	449,7	323,6	231,4	64,4	57,7	16	15	13	8	14	11	16
2005	339,9	470,6	236,8	69,1	66,1	22	14	15	16	15	7	11
2006	359,3	158,9	174,6	42,6	15,3	6	9	21	10	11	6	14
2007	875,4	324,2	371,1	96,0	40,8	12	12	10	9	11	12	8
2008	353,0	476,4	222,6	67,5								

*Source : JIRAMA à Mandraka*

## ANNEXE II : Méthode d'analyse des sols

### 1- Détermination du pH<sub>eau</sub> :

Dans un petit flacon, on ajoute 10 g de sol tamisé sur un tamis de 2mm de diamètre et 20ml d'eau (eau distillée). Pour qu'il y ait une bonne présentabilité de l'échantillon à mesurer, l'idéal est de boucher et agiter le flacon pendant 30mn à l'aide d'un agitateur. Mais, faute de l'absence d'un agitateur, la préparation sera agitée manuellement tel que dans un intervalle de 30mn, on agite le flacon pendant une minute toutes les cinq minutes.

Avant chaque lecture (sur l'appareil), après avoir callé l'appareil, le pH mètre normalisé par une solution qui a un pH égale à 7 ; le rincer par l'eau distillée après chaque intervention.

### 2- Analyse granulométrique :

Pour des sols calcaires ou non calcaires, la méthode par gravitation comprend les trois traitements ci-après :

- Préparation du sol à analyser : ajouter 100ml d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans un bécher contenant 20g de sol et le laisser reposer pendant 24h.
- Dispersion des agrégats par une solution d'Hexamétaphosphate de sodium à 50g par litre ;
- Détermination de la proportion des particules (sables, argiles et limons) à l'aide des tamis et de la pipette de robinson.

#### Mode opératoire :

. 1<sup>er</sup> traitement : peser 20g de sol, le mettre dans un bécher et ajouter 100ml d'eau oxygénée H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 20 volumes. Le reposer pendant 24h après avoir agiter ou le porter au bain-marie pendant une ou deux heures.

. 2<sup>ème</sup> traitement : disperser ses agrégats par une solution d'Hexamétaphosphate de sodium à 50g par litre et par un volume d'eau de 100 ml. Agiter l'ensemble au moins pendant une minute.

. 3<sup>ème</sup> traitement :

- ✓ Détermination de la proportion de sable grossier et de sables fin :

Tamiser à deux temps la préparation sur tamis de 0,2mm et de 0.05mm. En effet, les particules refusées, après les avoir bien lavés, au tamis 0,2mm correspondent aux sables grossiers et celle au tamis de 0,05mm aux sables fins.

- ✓ Détermination de la proportion des argiles, des limons et des sables très fins:

Après le lavage des sables grossiers et des sables fins, mettre le reste dans une éprouvette de 1 litre et le remplir de l'eau jusqu'à l'obtention d'un volume de 1 litre. Trois prélèvements ont été réalisés de telle sorte que le premier sera à 4h après l'agitation, à 5cm; la deuxième sera à 4mn et 30s après de nouveau agitation, à 10cm; et la troisième sera à 1mn après agitation et à 12,5cm de la surface.

Ces prélèvements sont mis à l'étuve 105° afin que l'eau puisse s'évaporer. Peser au préalable à l'aide d'une balance de précision les petites pilules contenant les prélèvements.

- Le premier prélèvement est constitué d'argiles (A)
- Le second prélèvement est constitué d'argiles (A) et de limons (L)
- Et la dernière est constituée à la fois des argiles (A), des limons (L) et des sables très fins (STF)

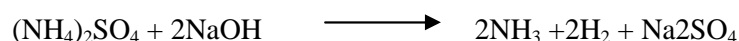
La méthode de calcul sera comme suite :

- . [Pilule plein A – pilule vide] x 500 = A%
- . [Pilule plein (A+L) – pilule vide] x 500 - A% = L%
- . [Pilule plein (A+L+STF) – pilule vide] x 500 - A% - L% = STF%
- . Poids de sable grossier x 5 = SG%
- . Poids de sable fins x 5 = SF%

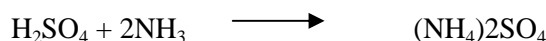
NB : Après tous les calculs, enlever 10% sur argiles à cause de l'Hexamétaphosphate

### 3- Dosage de l'azote total :

Principe : le sulfate d'ammonium est décomposé par la soude concentrée à l'ébullition suivant la réaction



L'ammoniac qui se dégage est entraîné à la vapeur il est alors recueilli dans un volume connu et suffisamment grand d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> N/10



L'excès de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> est dosé par une solution titrée de NaOH en présence de l'indicateur de tashiro.

#### Mode opératoire

On verse dans le ballon générateur de vapeur d'eau de l'eau distillée à la 2/3, on ajoute quelques grains de pierre ponce pour régulariser l'ébullition

On ouvre la circulation d'eau.

Du réfrigérant,

On porte l'eau du ballon à l'ébullition.

On arrête le chauffage : il se produit dépression dans l'appareil qui permet à l'eau de s'évacuer par E.

Alors le volume d'ammonium dégagé dans le sol est de (25 – n) ml ; or 1ml d'acide sulfurique N/10 correspondent à 1,4mg d'azote. Donc (25- n) x 1,4mg d'azote.

### 4- Dosage du carbone

Dans la burette : K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (N) : orangé

- a) Peser 2 g de terre fine (3g pour PE4), la verser dans une fiole conique de 500ml (ou bécher de 250ml)



- Ajouter :
- . 10ml de solution (N) de  $K_2Cr_2O_7$  (pipette)
  - . 20ml  $H_2SO_4$  concentré (éprouvette)

Agiter 1 mn

Laisser reposer 30mn sur une plaque de bois. La chaleur dégagée par l'hydratation de  $H_2SO_4$  favorise l'oxydation de la matière organique.

- b) Ajouter :
- . 200ml d'eau distillée
  - . 20ml  $H_2SO_4$  concentré
  - . 10ml  $H_3PO_4$  concentré (orthophosphorique)
  - . 20ml Sel de Mohr (vert)
  - . 20ml de diphénylamine sulfonate de baryum

Titrer en retour par le bichromate l'excès de sel de Mohr jusqu'au virage de l'indicateur au violet franc. Si la quantité d'oxydant consommé est faible, augmenter la prise d'essai pour améliorer la prise d'essai.

Etalonnage du sel de Mohr :

Dans une fiole conique de 200ml :

- . 20ml de sel de Mohr
- . 10ml  $H_2SO_4$  concentré
- . 2ml de diphénylamine

Traiter jusqu'au virage du vert au violet

**5- Indice d'instabilité « Is »**

Dans 3 béchers (I, II, et III) de 250ml, mettre 10g de sol puis mettre respectivement 10ml d'eau, 10ml d'alcool éthylique et 10ml de benzène.

- . Laisser reposer pendant 10mn.
- . Brutalelement verser 150ml d'eau.
- . Laisser reposer pendant 30mn.
- . Transvaser dans 3 erlens.
- . Effectuer alors 20 retournements.
- . Tamiser (30cycles à raison d 1 cycle par seconde).
- . Récupérer les agrégats dans 3 capsules.
- . Décanter et peser après séchage à l'étuve.
- . Soustraire les sables grossier à des agrégats.
- . Transvaser le contenu des cristallisoirs dans 3 allonges.
- . Compléter à 1L.
- . Faire une agitation ménagée par retournement.
- . Avec la pipette de Robinson ; déterminer le taux d'éléments inférieur à 20 microns (soit 4mn 45secondes pour 10cm).
- . Récupérer A+L dans 3 pillules pesées au préalable avec le plus grand soin.

### ANNEXE III : Détermination de l'indice d'érodabilité K

#### Classification de la structure

- 1- Grumeleuse
- 2- Finement polyédrique
- 3- Polyédrique moyen à grossier
- 4- Colonne, feuilletée ou massive

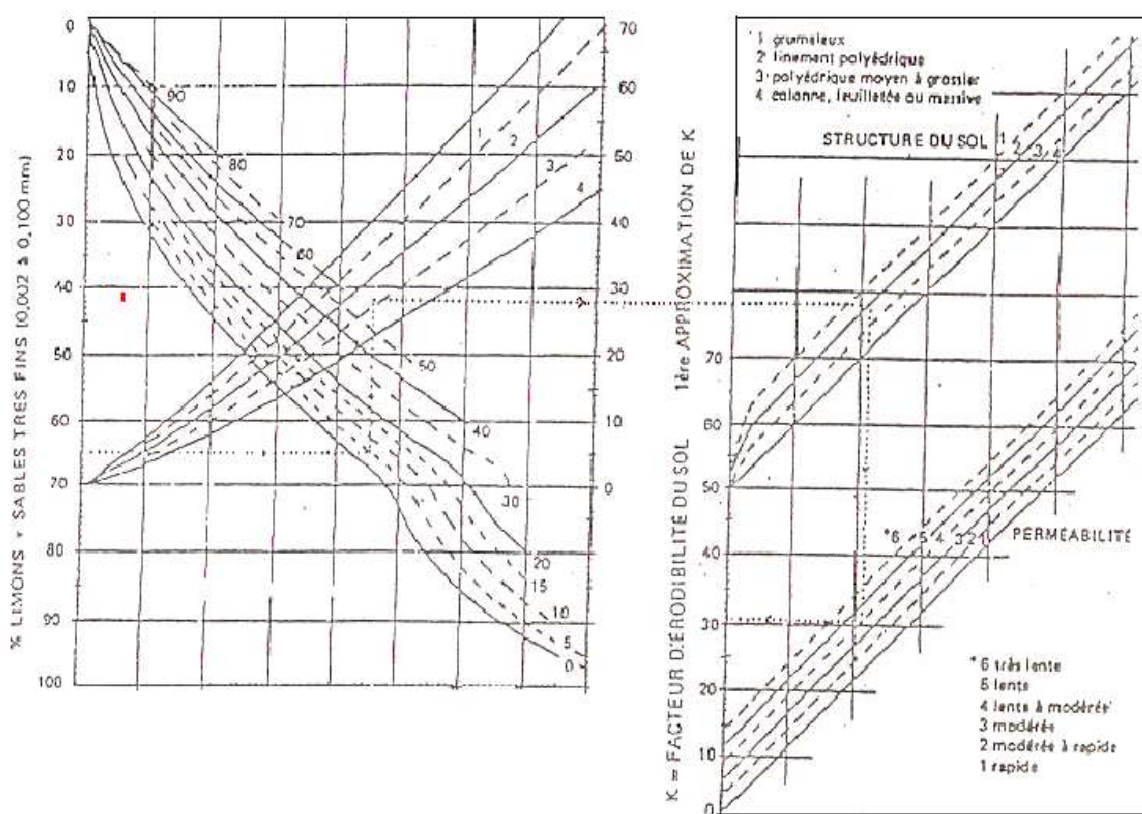
#### Classe de perméabilité

- 1- Rapide
- 2- Moyenne à rapide
- 3- Moyenne
- 4- Assez lente
- 5- Lente
- 6- Très lente

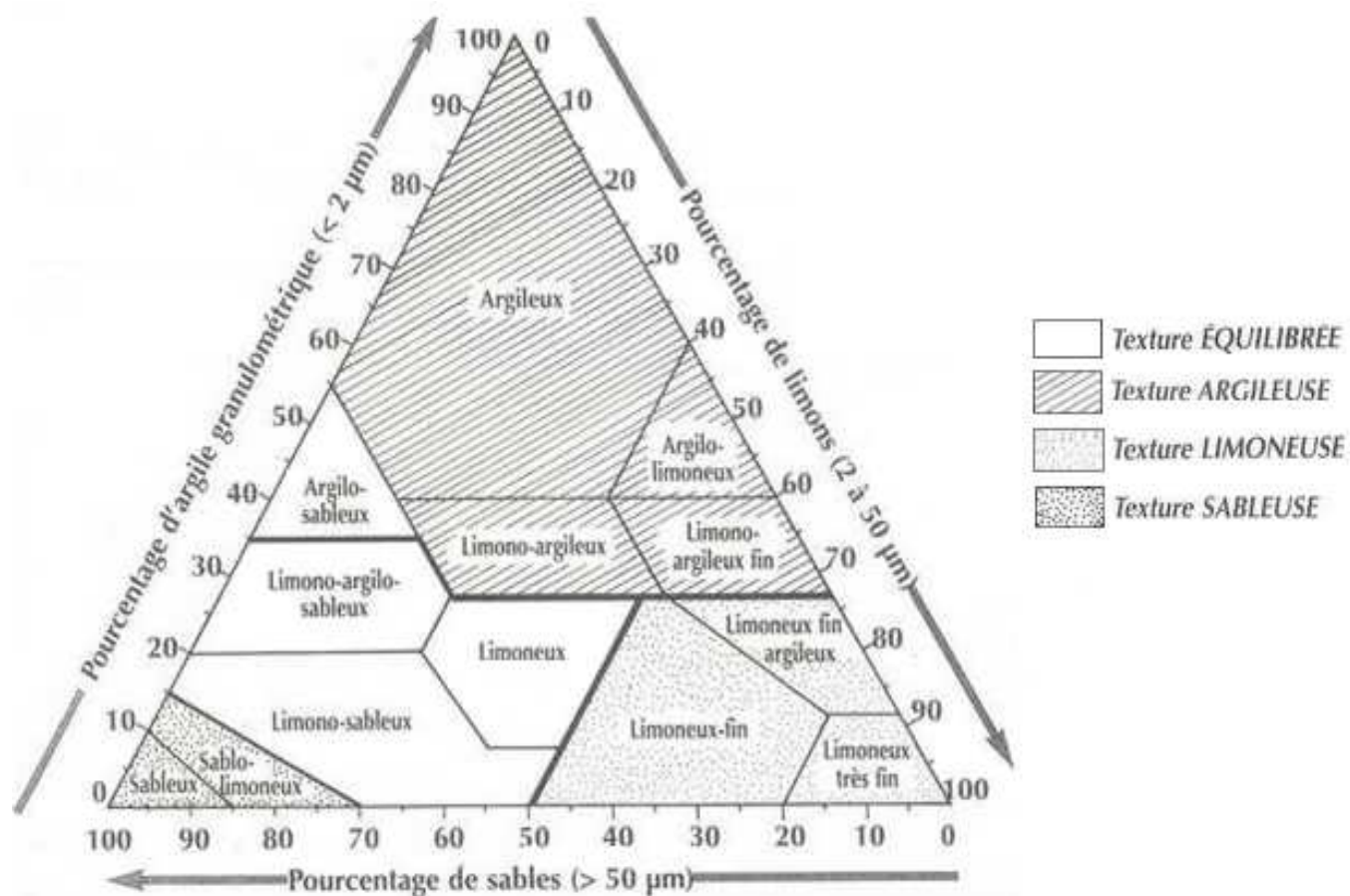
	Limon%+sables très fin %	Sable %	MO%	Structures	perméabilité
PE1	30,79	50,15	3,71	2	3
PE2	19,90	68,56	3,63	1	3
PE3	21,37	43,82	3,74	2	3
PE4	15,72	71,93	2,41	1	3
PE5	36,68	38,76	3,67	1	3
PE6	12,11	81,63	3,63	1	2

#### Nomographe de Wishmeier

Le nomographe de Wishmeier permet une évaluation rapide du facteur « K » d'érodabilité des sols (Wishmeier *et al*, 1971 citée par ROOSE, 1991)



# ANNEXE IV : Triangle de texture

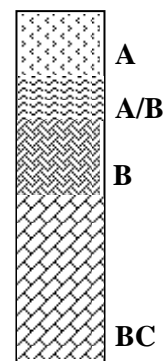


## ANNEXE V : Description du profil pédologique

- ✓ **Parcelle élémentaire 1** : parcelle sur terrassement de première année et sur la parcelle à lutte biologique

- Type de sol : sol typique
- Litière A<sub>0</sub> : 0 à 1.5 cm
- Coordonnées géographiques

	A	B	C	D
Latitude	18,91542	18,91537	18,91536	18,91541
Longitude	47,91858	47,91866	47,91867	47,91859
Altitude	1273	1275	1274	1275

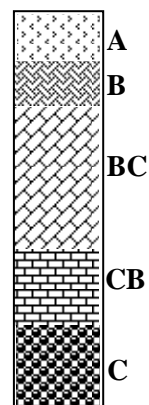


Horizon	A	A/B	B	BC
Épaisseur	0 à 20 cm	10 cm	25 cm	50 cm
Couleur				
- Humide	5YR 3/4	5YR 4/6	2.5YR 4/6	5YR 5/8
- séché	7.5YR 5/4	5YR 6/6		
Texture	limoneux	limono-sableux	limono-sableux	argilo-sableux
Structure	grumeleuse	grumeleuses à tendance polyédrique à la base	polyédrique	polyédrique fine
Cohésion	faible	faible	Faible à moyenne	moyenne
Activité faunique	oui	oui	oui	oui
Enracinement	très bon	très bon	bon	bon à moyen
porosité	très poreux	poreux	moyenne	moyenne
Perméabilité	perméable	perméable	perméable	perméable

- ✓ **Parcelle élémentaire 2** : parcelle sur aménagement en terrasse combinée avec des luttes biologiques de deuxième année.

- Type de sol : sol typique à tendance se rajeunir
- Litière A<sub>0</sub> : 0 à 2 cm
- Coordonnées géographiques

	A	B	C	D
Latitude	18,91691	18,91691	18,91693	18,91689
Longitude	47,91974	47,91691	47,91969	47,91977
Altitude	1255	1252	1246	1252



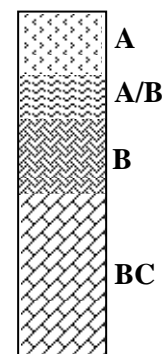
Horizon	A	B	BC	CB	C*
Épaisseur	0 à 15 cm	10 cm	40 cm	25cm	20cm
Couleur					
- Humide	5YR 4/4	2.5YR 4/6	2.5YR 5/6	2.5YR5/6	5YR 4/4
- séché	7.5YR 5/6	5YR 6/8	x	x	x
Texture	limono-sableux	argileux	argilo-sableux	argilo-sableux	limono-sableux
Structure	grumeleuse	grumeleuse à tendance polyédrique	polyédrique	polyédrique	polyédrique
Cohésion					
Activité faunique	oui	oui	oui	oui	non
Enracinement	très bon	moyen	moyen à peu	quelque enracinement suivant les fentes	non
porosité	très poreux	poreux	moyenne	moyenne	moyenne
Perméabilité	perméable	perméable	perméable	perméable	perméable

(\*) Les couches C présentent de nombreux éléments minéraux notamment les « Micas »

✓ **Parcelle élémentaire 3** : parcelle sur terrassement de première année et sur la parcelle à lutte biologique

- Type de sol : sol typique
- Litière A<sub>0</sub> : 0 à 1.5 cm
- Coordonnées géographiques

	A	B	C	D
Latitude	18,91551	18,91554	18,91566	18,9157
Longitude	47,91843	47,91841	47,91838	47,91846
Altitude	1264	1283	1282	1281

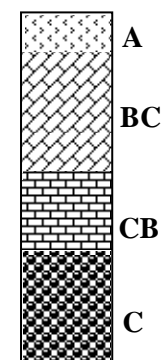


Horizon	A	A/B	B	BC
Épaisseur	0 à 20 cm	10 cm	25 cm	50 cm
Couleur				
- Humide	5YR 3/4	5YR 4/6	2.5YR 4/6	5YR 5/8
- séché	7.5YR 5/4	5YR 6/6	x	x
Texture	limono-argileux	limono-sableux	limono-sableux	argilo-sableux
Structure	grumeleuse	grumeleuses à tendance polyédrique à la base	polyédrique	polyédrique fine
Cohésion	faible	Faible	faible à moyenne	moyenne
Activité faunique	oui	oui	oui	oui
Enracinement	très bon	très bon	Bon	bon à moyen
Porosité	très poreux	poreux	moyenne	moyenne
Perméabilité	perméable	perméable	perméable	perméable

✓ **Parcelle élémentaire 4** : parcelle sous « tavy »

- Type de sol : sol rajeuni à fortement rajeuni
- Litière A<sub>0</sub> : 0 à 2 cm
- Coordonnées géographiques

	A	B	C	D
Latitude	18,91625	18,9163	18,91936	18,9163
Longitude	47,91979	47,91979	47,91979	47,9198
Altitude	1257	1257	1256	1244

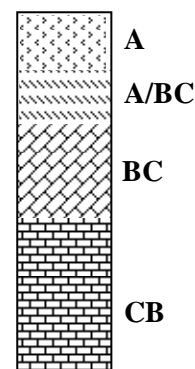


Horizon	A	BC	CB	C
Épaisseur	0 à 10 cm	50 cm	20 cm	50 cm
Couleur				
- Humide	5YR 4/3	2.5YR 4/8	7.5YR 5/8	7.5YR 6/6
- séché	7.5YR 6/4	5YR 5/6	x	x
Texture	sablo-limoneux	argileux	argilo-sableux	Argilo-sableux
Structure	grumeleuses	polyédriques fines	polyédriques fines	Polyédriques très fines à tendances particulière faible
Cohésion	faible	moyenne	moyenne à faible	faible
Activité faunique	oui	oui	oui	non
Enracinement	Très bon	moyenne à faible	faible	suivant ligne de fente
Porosité	bonne	moyenne à faible	faible	moyenne
Perméabilité	perméable	perméable	Peu perméable	perméable

✓ **Parcelle élémentaire 5** : parcelle sous « savoka » ou jachère de 5 ans

- Type de sol : sol typique à tendance à se rajeunir
- Litière A<sub>0</sub> : litière de 0 à 2 cm
- Coordonnées géographiques de la parcelle

	A	B	C	D
Latitude	18,91561	18,91553	18,91551	18,91559
Longitude	47,91862	47,91864	47,91856	47,91853
Altitude	1260	1259	1262	1262

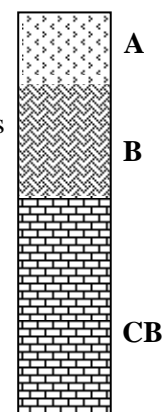


Horizon	A	A / BC	BC	CB
Épaisseur	0 à 15 cm	10 cm	30 cm	65 cm
Couleur				
- Humide	5YR 3/3	5YR 4/4	5YR 4/6	2.5YR 4/6
- séché	10YR 4/3	5YR 6/6	x	x
Texture	limoneux	limono-argileux	argilo-sableux	argilo-sableux
Structure	grumeleuse	grumeleuse et polyédrique à la base	polyédrique	polyédrique
Cohésion	faible à moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Activité faunique	oui	existence des pores due à l'activité biologique	oui	
Enracinement	bon	moyen à faible	moyen à faible	faible : suivant les fentes de déhiscences
Porosité	bonne porosité	moyenne	moyenne	faible
Perméabilité	perméable	perméable	perméable	perméable

✓ **Parcelle élémentaire 6** : parcelle sous forêt naturelle

- Type de sol : sol typique
- Litière A<sub>0</sub> : 0 à 7 cm débris végétaux plus ou moins décomposés
- Coordonnées géographiques de la parcelle

	A	B	C	D
Latitude	18,91794	18,91797	18,91815	18,91807
Longitude	47,91818	47,9182	47,91806	47,91807
Altitude	1253	1253	1253	1261



Horizon	A	B	CB
Épaisseur	0 à 20 cm	40 cm	90 cm
Couleur			
- Humide	2.5YR 3/2	2.5YR 4/6	2.5YR 4/3
- séché	5YR 4/4	2.5YR 4/6	x
Texture	sablo-limoneux	sablo-limoneux	sablo-argileux
Structure	particulière	polyédrique fine	polyédrique
Cohésion	faible	faible	moyenne
Activité faunique	oui	oui	oui
Enracinement	très bon	bon	moyen à faible
Porosité	bonne	moyenne	moyenne
Perméabilité	perméable	perméable	perméable

**ANNEXE VI : Synthèses des résultats d'analyse au laboratoire**

	<b>PE1</b>	<b>PE2</b>	<b>PE3</b>	<b>PE4</b>	<b>PE5</b>	<b>PE6</b>
<b>Horizon A</b>						
PH	5,14	6,07	5,95	6,24	6,26	4,79
Granulométrie						
- Sable %	50,15	68,56	43,82	71,93	38,76	81,63
- Limon %	30,79	19,90	21,37	15,72	36,68	12,11
- Argile %	19,06	11,54	34,80	12,35	24,56	6,26
C%	2,04	2,00	2,06	1,33	2,02	2,00
N%	0,28	0,26	0,32	0,14	0,30	0,26
C/N	7,28	7,69	6,43	9,47	6,73	7,69
M O%	3,71	3,63	3,74	2,41	3,67	3,63
Da	0,84	0,90	0,70	0,93	0,97	0,59
K	0,10	0,09	0,05	0,12	0,10	0,05
Is	0,55	0,83	1,18	0,84	0,96	0,74
<b>Horizon B</b>						
PH	5,79	5,34	5,79	5,16	5,49	4,92
Granulométrie						
- Sable %	55,37	27,64	55,37	40,98	38,93	56,32
- Limon %	25,92	29,74	25,92	17,49	23,08	32,02
- Argile %	18,71	42,63	18,71	41,52	37,99	11,66
<b>Perte en terre max</b>						
C%	2,04	1,97	2,00	1,33	2,02	2,10
N%	0,28	0,21	0,30	0,14	0,21	0,30
C/N	7,28	9,39	6,66	9,47	9,61	6,99
M O%	3,71	3,58	3,64	2,41	3,67	3,81

*K : indice d'érodabilité ; Is : indice d'instabilité ; C : quantité carbone ; MO : quantité matière organique.*

## ANNEXE VII : Résultats des mesures d'érosion et de ruissellement

## Pertes en terre (Kg/Ha)

n°	Date	Pluviométrie (mm)	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4	PE 5	PE 6
1	29/02/2008	6,65	352	65	110	57	20	6
2	02/03/2008	16,1	47	92	18	10	19	10
3	03/03/2008	1,35	11	11	2	3	2	2
4	04/03/2008	8,93	27	19	4	6	6	5
5	05/03/2008	10,39	80	65	8	8	8	5
6	06/03/2008	16,93	67	44	32	24	5	7
7	07/03/2008	10,59	26	44	8	11	4	5
8	08/03/2008	37,91	54	20	11	10	4	2
9	09/03/2008	5,19	29	9	9	5	3	2
10	10/03/2008	1,45	17	0	0	1	1	0
11	11/03/2008	11,43	26	15	3	16	5	1
12	12/03/2008	14,54	21	9	6	5	4	1
13	13/03/2008	8,62	30	9	8	8	4	2
14	18/03/2008	99,3	317	190	151	5454	39	12
15	20/03/2008	3,12	40	13	4	31	2	0
16	21/03/2008	0,93	19	0	2	7	0	0
17	27/03/2008	10,49	221	138	18	73	6	3
18	28/03/2008	8,31	79	37	6	23	2	2
19	29/03/2008	13,71	81	32	6	15	3	3
20	30/03/2008	8,83	84	33	4	17	2	2
21	31/03/2008	0,52	13	6	1	4	0	0
22	01/04/2008	1,77	42	34	5	16	2	1
23	03/04/2008	5,5	86	70	9	45	3	1
24	04/04/2008	7,79	117	134	16	95	4	2
25	06/04/2008	14,96	250	197	25	282	8	9
26	11/04/2008	1,77	19	14	3	8	0	0
27	13/04/2008	2,6	30	22	6	23	3	1
28	20/04/2008	2,6	52	14	3	17	1	1
29	24/04/2008	0,93	15	7	0	5	0	0
30	25/04/2008	2,49	59	32	3	21	4	1
<b>Moyenne</b>			<b>74,55</b>	<b>44,36</b>	<b>15,52</b>	<b>203,42</b>	<b>5,29</b>	<b>2,77</b>
<b>Erreur standard</b>			<b>31,785</b>	<b>19,02</b>	<b>11,45</b>	<b>349,19</b>	<b>2,79</b>	<b>1,13</b>



**Ruissellement (L/Ha)**

<b>n°</b>	<b>date</b>	<b>Pluviométrie (mm)</b>	<b>PE1</b>	<b>PE2</b>	<b>PE3</b>	<b>PE4</b>	<b>PE5</b>	<b>PE6</b>
1	29/02/2008	6,65	1 429	286	495	1 435	651	91
2	02/03/2008	16,1	4 202	1 905	143	978	848	126
3	03/03/2008	1,35	1 723	476	48	339	197	94
4	04/03/2008	8,93	6 092	762	323	756	719	207
5	05/03/2008	10,39	1 639	1 810	143	822	445	94
6	06/03/2008	16,93	11 765	5 206	656	2 556	2 226	408
7	07/03/2008	10,59	3 529	2 984	323	39	1 079	132
8	08/03/2008	37,91	17 227	7 587	1 294	3 508	3 279	1 450
9	09/03/2008	5,19	5 378	2 413	238	782	985	232
10	10/03/2008	1,45	882	95	124	39	17	6
11	11/03/2008	11,43	3 109	2 317	247	926	1 130	151
12	12/03/2008	14,54	9 328	2 571	1 446	1 917	1 378	176
13	13/03/2008	8,62	6 891	4 413	542	861	1 190	119
14	18/03/2008	99,3	98 361	56 603	15 677	93 558	69 247	4 556
15	20/03/2008	3,12	2 143	921	76	326	171	31
16	21/03/2008	0,93	294	-	29	-	13	-
17	27/03/2008	10,49	5 546	5 651	1 208	1 891	2 817	364
18	28/03/2008	8,31	3 445	3 365	447	1 200	899	320
19	29/03/2008	13,71	4 370	2 762	1 008	1 982	1 567	163
20	30/03/2008	8,83	10 084	2 857	1 427	2 726	2 226	126
21	31/03/2008	0,52	210	159	38	261	163	13
22	01/04/2008	1,77	924	952	190	835	205	63
23	03/04/2008	5,5	8 782	7 429	799	6 599	1 027	264
24	04/04/2008	7,79	6 807	9 016	1 256	24 778	1 490	402
25	06/04/2008	14,96	34 244	42 857	2 607	38 732	6 764	929
26	11/04/2008	1,77	378	381	19	130	17	6
27	13/04/2008	2,6	420	635	48	196	43	13
28	20/04/2008	2,6	840	762	19	65	26	25
29	24/04/2008	0,93	420	159	10	39	17	6
30	25/04/2008	2,49	630	1 270	114	143	51	38
<b>Moyenne</b>			<b>8099</b>	<b>5438</b>	<b>999</b>	<b>6078</b>	<b>3254</b>	<b>342</b>
<b>Erreur standard</b>			<b>6464,83</b>	<b>4364,23</b>	<b>998,71</b>	<b>6471,50</b>	<b>4410</b>	<b>299,39</b>

## ANNEXE VIII : Analyses statistiques

### 1. Dynamisme du climat

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total	Moy	Var	Ecart
1950 -1980	386,8	369,6	351	110	66,9	64	91,7	119,9	51,8	86,7	232,8	369,3	<b>2300,5</b>	191,7	19329,9	139
1992 - 2007	530,9	379	276,9	76,1	53,4	40,4	50,3	40,9	32,7	40,5	123,6	319,3	<b>1964</b>	163	28649	169,2

Comparaison des variances de k échantillons Test de Levene : moyenne	
F (valeur observée)	1,040
F (valeur critique)	5,827
p-value	0,319
Alpha	0,05

*Conclusion : Au seuil de signification  $\alpha = 0,05$  on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des variances.*

Test t de Student pour données appariées	
t (valeur observée)	1,542
t (valeur critique)	2,201
p-value	0,151
Alpha	0,05

*Conclusion : Au seuil de signification  $\alpha = 0,05$ , la différence entre les moyennes n'est pas significative.*

### 2. Pertes en terre et ruissellement

#### Pertes en terre (Kg/Ha)

	Moyenne	Minimum	Maximum
PE1	75	11,19	352
PE2	44	0,00	197
PE3	16	0,00	151
PE4	203	0,80	5454
PE5	5	0,00	39
PE6	3	0,00	12

#### Ruissellement (L/Ha)

	Moyenne	Minimum	Maximum
PE1	8099	210	98361
PE2	5438	0,0	56603
PE3	999	9,5	15677
PE4	6078	0,0	93558
PE5	3254	12,8	69247
PE6	342	0,0	4556

Comparaison des variances de k échantillons Test de Levene	
F (valeur observée)	3,892
F (valeur critique)	2,640
p-value	0,002
Alpha	0,05

*Conclusion : Au seuil de signification  $\alpha=0,05$ , l'inégalité des variances est significative*

Comparaison des variances de k échantillons Test de Levene	
F (valeur observée)	3,313
F (valeur critique)	2,640
p-value unilatérale	0,007
Alpha	0,05

*Conclusion : Au seuil de signification  $\alpha=0,05$ , l'inégalité des variances est significative.*

Test de comparaison des échantillons indépendants par le test de Mann-Whitney :

Perte en terre						
	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
PE1	1	0,035	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
PE2	0,035	1	0,0001	<b>0,081</b>	0,0001	0,0001
PE3	0,0001	0,0001	1	0,007	0,020	0,0001
PE4	0,0001	<b>0,081</b>	0,007	1	0,0001	0,0001
PE5	0,0001	0,0001	0,020	0,0001	1	<b>0,052</b>
PE6	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	<b>0,052</b>	1

Ruissellement						
	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
PE1	1	<b>0,152</b>	0,000	0,004	0,000	0,000
PE2	<b>0,152</b>	1	0,000	<b>0,088</b>	0,017	0,000
PE3	0,000	0,000	1	0,030	<b>0,183</b>	0,032
PE4	0,004	<b>0,088</b>	0,030	1	<b>0,535</b>	0,000
PE5	0,000	0,017	<b>0,183</b>	<b>0,535</b>	1	0,004
PE6	0,000	0,000	0,032	0,000	0,004	1

Les différences non significatives entre individus au seuil  $\alpha = 5\%$  sont représentées par valeurs en gras.

### 3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Classification des variables par estimation

	Couverture végétale (%)	Enracinement	Exposition
PE1	15	1 : faibles	2 : exposé
PE2	60	2 : moins développés	1 : moins exposé
PE3	80	3 : développés	2 : exposé
PE4	10	1 : faibles	1 : moins exposé
PE5	100	3 : développés	2 : exposé
PE6	120	4 : très développés	1 : moins exposé

	Moyenne	Ecart-type
Perte en terre	1,08	1,34
Ruissellement	110099	9612
Couverture végétale	64,16	40,87
Enracinement	2,33	1,11
Exposition	1,50	0,50
Pente	73,66	3,90
C/N	7,54	0,98
MO	3,46	0,47
S	59,07	15,69
L	22,76	8,48
A	18,09	9,47
Da	0,82	0,13
PH	5,74	0,57

## Matrice de corrélation

	Perte	Ruiss.	C. vég	Enrac.	Expos	Pente	C/N	MO	S	L	A	Da	PH
Perte en terre	1	<b>0,943</b>	<b>-1,000</b>	<b>-0,971</b>	-0,098	-0,698	0,406	-0,232	0,086	0,029	0,086	0,371	0,257
Ruissellement	<b>0,943</b>	1	<b>-0,943</b>	<b>-0,971</b>	0,098	-0,577	0,232	0,000	-0,029	0,200	0,143	0,257	0,086
Couverture végétale	<b>-1,000</b>	<b>-0,943</b>	1	<b>0,971</b>	0,098	0,698	-0,406	0,232	-0,086	-0,029	-0,086	-0,371	-0,257
Enracinement	<b>-0,971</b>	<b>-0,971</b>	<b>0,971</b>	1	0,000	0,657	-0,358	0,179	0,000	-0,177	-0,088	-0,441	-0,265
Exposition	-0,098	0,098	0,098	0,000	1	0,311	<b>-0,891</b>	<b>0,891</b>	<b>-0,878</b>	<b>0,878</b>	<b>0,878</b>	0,098	0,098
Pente	-0,698	-0,577	0,698	0,657	0,311	1	-0,370	0,370	0,030	-0,030	0,030	-0,577	-0,577
C/N	0,406	0,232	-0,406	-0,358	<b>-0,891</b>	-0,370	1	<b>-0,941</b>	<b>0,841</b>	-0,725	<b>-0,812</b>	0,116	0,000
MO	-0,232	0,000	0,232	0,179	<b>0,891</b>	0,370	<b>-0,941</b>	1	-0,725	0,667	0,754	-0,290	-0,232
S	0,086	-0,029	-0,086	0,000	<b>-0,878</b>	0,030	<b>0,841</b>	-0,725	1	<b>-0,943</b>	<b>-0,886</b>	-0,429	-0,486
L	0,029	0,200	-0,029	-0,177	<b>0,878</b>	-0,030	-0,725	0,667	<b>-0,943</b>	1	0,771	0,486	0,429
A	0,086	0,143	-0,086	-0,088	<b>0,878</b>	0,030	<b>-0,812</b>	0,754	<b>-0,886</b>	0,771	1	0,257	0,371
Da	0,371	0,257	-0,371	-0,441	0,098	-0,577	0,116	-0,290	-0,429	0,486	0,257	1	<b>0,943</b>
PH	0,257	0,086	-0,257	-0,265	0,098	-0,577	0,000	-0,232	-0,486	0,429	0,371	<b>0,943</b>	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil  $\alpha = 5\%$  (test bilatéral)

Cos <sup>2</sup> des variables			
Axes	F1	F2	F3
Perte en terre	0,005	<b>0,913</b>	0,064
Ruissellement	0,007	<b>0,770</b>	0,219
Couverture végétale	0,005	<b>0,913</b>	0,064
Enracinement	0,001	<b>0,910</b>	0,074
Exposition	<b>0,908</b>	0,012	0,063
Pente	0,008	0,679	0,092
C/N	<b>0,752</b>	0,168	0,017
MO	<b>0,730</b>	0,004	0,114
S	<b>0,960</b>	0,001	0,028
L	<b>0,923</b>	0,020	0,002
A	<b>0,802</b>	0,008	0,001
Da	0,111	0,368	<b>0,446</b>
PH	0,124	0,240	<b>0,624</b>
Cos <sup>2</sup> des individus			
Axes	F1	F2	F3
PE1	<b>0,231</b>	0,215	<b>0,376</b>
PE2	0,206	<b>0,259</b>	0,106
PE3	<b>0,411</b>	0,189	0,001
PE4	0,336	<b>0,539</b>	0,021
PE5	<b>0,629</b>	0,064	<b>0,253</b>
PE6	0,305	<b>0,593</b>	0,060

Les valeurs en gras marquent la portance des variables et des individus sur les axes de l'ACP

## ANNEXE IX : Classe d'érosion

Les classes de risque d'érosion ont été établies comme suites d'après VLIET (2001) :

- classe 1 : très faible ( $< 6 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );
- classe 2 : faible ( $6 \text{ à } 11 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );
- classe 3 : modérée ( $11 \text{ à } 22 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );
- classe 4 : élevée ( $22 \text{ à } 33 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );
- et classe 5 : grave ( $> 33 \text{ t/ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ).

## ANNEXE X : Détermination des MO, C et N lessivés par l'érosion

$$Q_{X \text{ lessivés}} = 10\,000 \times H_A \times D_a \times X$$

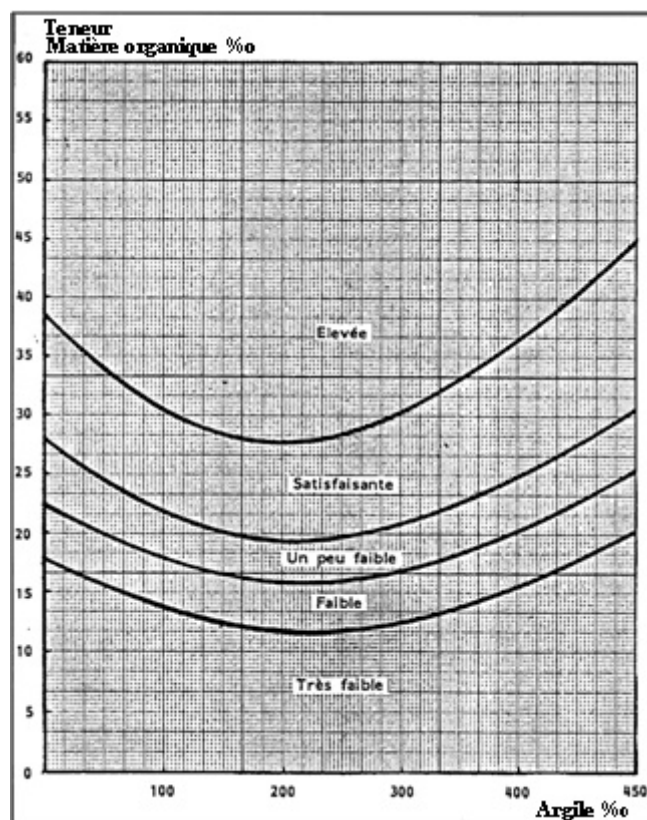
Soit X : matières organiques ou carbone ou azote

HA : épaisseur de l'horizon A

Da : densité apparente

	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
MO (horizon A) en %	3,71	3,63	3,74	2,41	3,67	3,63
MO (perte en terre) en %	3,71	3,58	3,63	2,41	3,67	3,81
Da	0,84	0,90	0,70	0,93	0,97	0,59
H de l'horizon A	0,20	0,15	0,20	0,10	0,15	0,20
Perte en terre (t/ha/an)	6,85	5,28	1,36	20,93	0,44	0,13
MO (horizon A) en t/ha/an	62,33	49,01	52,36	22,41	53,40	42,83
<b>MO lessivés en t/ha/an</b>	<b>0,25</b>	<b>0,19</b>	<b>0,05</b>	<b>0,50</b>	<b>0,02</b>	<b>0,005</b>
N perte en terre en %	0,28	0,21	0,30	0,14	0,22	0,30
C perte en terre en %	2,04	1,97	2,00	1,33	2,02	2,10
<b>C lessivé en t/ha/an</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>0,28</b>	<b>0,01</b>	<b>0,003</b>
<b>N lessivé en t/ha/an</b>	<b>0,19</b>	<b>0,11</b>	<b>0,04</b>	<b>0,29</b>	<b>0,01</b>	<b>0,005</b>

## ANNEXE XI : Interprétation du niveau des matières organiques en fonction du taux d'argiles



Source : BOURGEAT (1972)